

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Optimalizace parametrů při autogenním řezání ocelí Weldox

Optimization of Parameters at Oxy – Fuel Cutting
of Weldox Steels

Student:

Bc. Jakub Bieronský

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Bieronský**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Optimalizace parametrů při autogenním řezání ocelí Weldox**
Optimization of Parameters at Oxy - Fuel Cutting of Weldox Steels
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii konstrukčních ocelí řady Weldox.
2. Zpracujte studii technologie tepelného dělení ocelí.
3. Proveďte posouzení stávajícího stavu.
4. Zhotovte zkušební vzorky pálením (s proměnlivými technologickými parametry).
5. Vyhodnoťte dosaženou kvalitu zkušebních řezů.
6. Proveďte diskusi dosažených výsledků a vyslovte závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

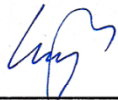
KUNCIPÁL, J. A KOL. *Teorie svařování*. Praha: SNTL Praha, 1986, 265 s.
KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, Ostrava, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 2002, 417 s. ISBN 80-85771-97-1.
KUČERA, J. *Teorie svařování*, VŠB Ostrava 1991.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : 15. 05. 2017



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen vedoucímu diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15.05.2017



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jakub Bieronský

Adresa trvalého pobytu autora práce: Pstružovská 330, Frýdlant nad Ostravicí, 739 11

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BIERONSKÝ, J. *Optimalizace parametrů při autogenním řezání ocelí Weldom : diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017, 57 s. Vedoucí práce: Krejčí, L.

Cílem této práce je optimalizaci parametrů při autogenním řezání ocelí Weldom s ohledem na dosažnou kvalitu řezných ploch. V teoretické části je uveden stručný úvod do problematiky vysokopevnostních ocelí řady Weldom. V další části je pak uvedena stručná studie tepelného dělení materiálu. Praktická část se zabývá měřením tvrdosti a optimalizací parametrů za účelem zlepšení kvality pálené plochy. Hlavním přínosem této diplomové práce je vyhodnocení zkoušek a zhodnocení dané optimalizace parametrů na kvalitu řezané plochy.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

BIERONSKÝ, J. *Optimization of Parameters at Oxy – Fuel Cutting of Weldom Steels : master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2017, 57 p. Thesis head: Krejčí, L.

The aim of this master thesis is optimization of parameters at oxy – fuel cutting of Weldom steels with respect to the quality of the cutting surface. The theoretical part presents brief introduction to high strength steels of Weldom series. In the next part is a brief study of the thermal division of the material. The practical part deals with hardness measurement and optimization of parameters in order to improve the quality of the cutting area. The main contribution of this master thesis is an evaluation of tests and evaluation of the given optimization of the parameters on the quality of the cut surface is made.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
SEZNAM POUŽITÝCH CHEMICKÝCH PRVKŮ	9
1. ÚVOD.....	10
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	11
2.1. STUDIE KONSTRUKČNÍCH OCELÍ ŘADY WELDOX	11
2.1.1. <i>Jemnozrnné oceli řady Weldom – S690QL.....</i>	<i>11</i>
2.1.2 <i>Svařitelnost vysokopevnostních jemnozrnných ocelí.....</i>	<i>12</i>
2.2. STUDIE TECHNOLOGIE TEPELNÉHO DĚLENÍ MATERIÁLU	12
2.2.1. <i>Dělení plamenem – 81</i>	<i>12</i>
2.2.1.1. Fyzikálně metalurgické procesy řezu	13
2.2.1.2. Řezatelnost plamenem (kyslíkem).....	14
2.2.1.3. Zařízení pro tepelné dělení plamenem.....	15
2.2.1.4. Poruchy a chyby při tepelném dělení plamenem	18
2.2.2. <i>Dělení plazmou – 83.....</i>	<i>20</i>
2.2.2.1. Fyzikální princip vzniku plazmy	21
2.2.2.2. Zařízení pro tepelné dělení plazmou.....	22
2.2.2.3. Používané plyny.....	24
2.2.2.4 Chyby při tepelném dělení plazmou	25
2.2.3. <i>Dělení laserem – 84.....</i>	<i>26</i>
2.2.3.1. Typy laserů	27
2.2.3.2. Metody dělení laserem.....	29
2.2.3.3. Řezatelnost a základní charakteristiky procesu	29
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	30
3.1. ZÁKLADNÍ MATERIÁLY POUŽITÉ PRO PÁLENÍ VZORKŮ	31
3.2. PÁLENÍ	32
3.3. KVALITA PÁLENÉ PLOCHY DLE ČSN EN ISO 9013	33
3.3.1. <i>Průměrná výška prvků profilu Rz5</i>	<i>33</i>
3.3.2. <i>Úchylka kolmosti (u).....</i>	<i>36</i>
3.3.3. <i>Skluz (n)</i>	<i>38</i>

3.4. MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	40
3.4.1. <i>Tvrlost pálené plochy</i>	41
3.4.2. <i>Tvrlost v TOO</i>	42
3.4.3. <i>Tvrlost základního materiálu</i>	44
4. ZÁVĚR	46
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48
6. SEZNAM PŘÍLOH	50
7. SEZNAM OBRÁZKŮ	51
8. SEZNAM TABULEK.....	52

Seznam použitých značek a symbolů

ZNAK	VELIČINA	JEDNOTKA
Δa	Zmenšení tloušťky řezu	[mm]
a	Tloušťka řezu	[mm]
Ac_1	Překrystalizační teplota	[°C]
C_e	Uhlíkový ekvivalent	[hm %]
ČSN	Česká technická norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
H	Reakční teplo	[kJ]
HV 5	Tvrdost podle Vickerse, zatížení 5 kg	[-]
HV 10	Tvrdost podle Vickerse, zatížení 10 kg	[-]
hm %	Hmotnostní procento	[-]
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
ln	Vyhodnocovaná délka	[mm]
lr	Základní délka	[mm]
n	Skluz	[mm]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu	[μ m]
R_{eH}	Minimální mez kluzu	[MPa]
R_m	Pevnost v tahu	[MPa]
Rz	Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	[μ m]
Rz5	Průměrná výška prvků profilu	[μ m]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]

T_p	Teplota přehřevu	[°C]
u	Úchylka kolmosti	[mm]
\bar{x}	Aritmetický průměr	[-]
Z_t	Výška prvku profilu	[μm]

Seznam použitých chemických prvků

AlN	Nitrid hlinitý	B	Bor	C	Uhlík
CO ₂	Oxid uhličitý	Cr	Chrom	Cu	Měď
C ₂ H ₂	Acetylen	Fe	Železo	FeO	Oxid železnatý
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý	Fe ₃ O ₄	Oxid železnato-železitý	Mn	Mangan
Mo	Molybden	N	Dusík	Nb	Niob
NbC	Karbid niobu	Ni	Nikl	O	Kyslík
O ₂	Molekula kyslíku	P	Fosfor	S	Síra
Si	Křemík	Ti	Titan	TiC	Karbid titanu
TiN	Nitrid titanu	V	Vanad	V ₄ C ₃	Karbid vanadu
Zr	Zirkonium				

1. Úvod

Tepelné dělení materiálu má největší uplatnění v řezání materiálů, např. plechů, dodávaných hutěmi v normalizovaných rozměrech, na polotovary. Metody tepelného dělení laserem, plazmou a plamenem patří dnes mezi nejznámější. V současné době jde vývoj technologií neustále dopředu a jsou kladeny čím dál větší nároky na jakost řezných ploch a ekonomickou náročnost z hlediska pořizovacích i provozních nákladů. Technologie dělení plamenem dosahuje obvykle menších řezných rychlostí než laser a plazma, avšak pořizovací a provozní náklady jsou mnohem nižší. Jakost řezných ploch je často pro další aplikace dostačující a je vhodná pro všechny tloušťky plechu.

Cílem této diplomové práce je optimalizovat parametry při dělení plamenem vysokopevnostních ocelí řady Weldox s kritériem na zlepšení jakosti povrchu řezu za zachování co nejmenších provozních nákladů. Bude provedeno hodnocení kvality pálené plochy se zaměřením na průměrnou výšku prvků profilu Rz5, úchylku kolmosti a skluz podle ČSN EN ISO 9013. Dále bude provedena zkouška tvrdosti pálených ploch, základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti ručním tvrdoměrem. Výsledné hodnoty tvrdosti budou porovnány s maximální povolenou tvrdostí dle ČSN EN 1090 – 2 + A1.

2. Současný stav řešené problematiky

2.1. Studie konstrukčních ocelí řady Weldox

Jedná se o vysokopevnostní, jemnozrnné mikrolegované oceli, které jsou zušlechťené kalením do vody. Vysokopevnostní oceli jsou nejvíce používány pro náročné nosné konstrukce, např. na mobilní jeřáby, ale také ve strojírenství a při konstrukci užitkových vozidel. [1]

2.1.1. Jemnozrnné oceli řady Weldox – S690QL

Tyto oceli jsou vyráběny tepelně mechanickým zpracováním, čímž se dosáhne jemnozrnné struktury. Použití tepelně mechanického zpracování zvýrazní vliv mikrolegujících prvků na vlastnosti materiálu – vazbou na dusík a uhlík ve formě precipitačního zpevnění dojde k výraznému zvýšení pevnosti při zachování dobré svařitelnosti a plasticity. Oceli jsou uklidněné hliníkem. [2, 3]

Jemnozrnné oceli musí obsahovat minimálně 0,015 % hliníku rozpustného v kyselinách. Další mikrolegující prvky u těchto ocelí jsou především Ti, V, Nb, Zr. Tyto prvky zjemňují zrna a musí být obsaženy v oceli v hodnotě minimálně 0,015%. Výše uvedené prvky vytváří s dusíkem a uhlíkem nitridy (AlN, TiN), karbidy (NbC, TiC, V_4C_3) nebo karbonitridy (V(C, N)), Ti (C, N)). Precipitační zpevnění těchto částic vede ke zvýšení meze kluzu a meze pevnosti. Titan váže dusík a tvoří nitrid TiN, který snižuje pravděpodobnost na vznik nitridů železa a tím zabraňuje stárnutí oceli. Niob zvyšuje teplotu rekrystalizace. Precipitáty, které dosahují velikosti přibližně do 50 nm, brání hrubnutí zrna tím, že brání migraci hranic zrn v mikrostruktuře při rekrystalizaci. Dochází také ke zlepšení svařitelnosti snížením uhlíkového ekvivalentu vazbou uhlíku na karbidy a karbonitridy. Precipitát niobu zabraňuje růstu zrn tak, že snižuje kinetiku rekrystalizace austenitu během deformace (válcování oceli). K zabránění růstu zrn při rekrystalizaci jsou precipitáty titanu a hliníku. [2, 3, 4]

2.1.2 Svařitelnost vysokopevnostních jemnozrnných ocelí

U jemnozrnných ocelí, při procesu svařování, předpokládáme pokles plastických vlastností v TOO z důvodu růstu zrn v TOO. Proto se tyto oceli svařují s omezeným měrným tepelným příkonem, pokud možno bez přehřevu. Pokud je použití přehřevu nevyhnutelné, tak v rozmezí teplot 100 až 150 °C. Při svařování termomechanicky zpracovaných mikrolegovaných ocelí předpokládáme vznik změkčené zóny, která vzniká v oblasti teplot kolem A_{c1} . V této zóně dojde ke snížení tvrdosti s tím i k poklesu pevnosti svarových spojů. Aby měla změkčená zóna, co nejmenší vliv na pevnostní vlastnosti svarového spoje svařujeme s co nejmenším měrným tepelným příkonem do svaru – dojde k zúžení TOO a tím i změkčené zóny. [3]

Vysokopevnostní oceli jsou náchylné ke vzniku trhlin za studena. Riziko vzniku trhlin za studena se zvyšuje s rostoucí hodnotou pevnosti v tahu, tloušťkou výrobku a uhlíkového ekvivalentu. Vznik těchto trhlin je zapříčiněn následujícími faktory, a to změkčenou strukturou v TOO (křehká struktura), tuhostí a stavem vnitřního pnutí svařence a množstvím vodíku, který je schopný difundovat do svarového kovu. [1, 4]

2.2. Studie technologie tepelného dělení materiálu

Tepelné dělení materiálu má v porovnání s mechanickými metodami dělení materiálu mnohem vyšší výrobní produktivitu. Mezi metody tepelného dělení materiálu řadíme řezání kyslíkem (plamenem), plazmou, laserem a svazkem elektronů. [5]

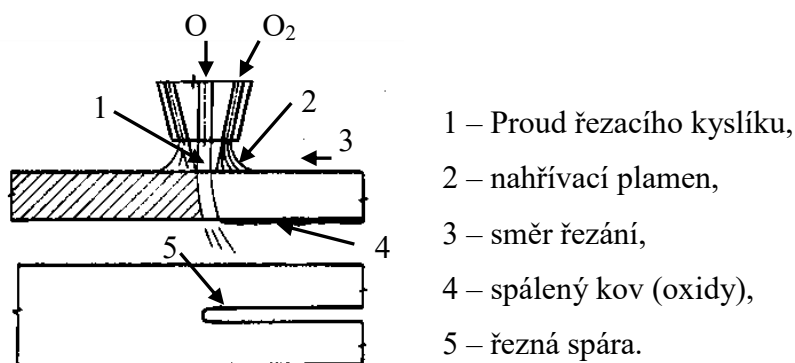
2.2.1. Dělení plamenem – 81

Dělení materiálu plamenem, neboli řezání kyslíkem, je nejstarší typ řezání použitelný pro ocel. Proces řezání kyslíkem je vnímán jako jednoduchý, s nízkou ekonomickou náročností. Největší výhodou této metody je schopnost řezání velkých tloušťek ocelí – záleží pouze na dostupném množství kyslíku. Kyslíkem se podařilo řezat ocel o tloušťce 1200 mm, při běžném použití v praxi (např. pro řezání tvarových výrobků z plechu) se většinou dělí ocel do tloušťek 300 mm. K zajištění účinného řezání kyslíkem je potřeba dodržet plynulost daného procesu řezání, zamezit vzniku trhlin, zajistit co nejmenší šířku řezu. [5, 6]

2.2.1.1. Fyzikálně metalurgické procesy řezu

Řezání kyslíkem lze rozdělit do dvou fází. V první fázi je materiál předehřát na zápalnou teplotu a poté je pod vysokým tlakem přiveden čistý kyslík, ve kterém shoří kov a vytvoří se řezná spára. Zápalná teplota se vztahuje k nejnižší teplotě, při které se materiál spaluje nebo začíná hořet. Tato teplota je v čistém kyslíku pro většinu ocelí 870 °C až 900 °C a je ovlivňována nejvíce množstvím uhlíku. Materiál předehřátý na zápalnou teplotu má barvu matně červenou. Pro zajištění plynulosti procesu dělení musí mít proud kyslíku postačující kinetickou energii k odstranění strusky z řezu, interakce a chemická reakce kovu musí být exotermická. [5, 7, 8]

Na obr. 1 je znázorněn princip řezání kyslíkem, kde jsou znázorněny jednotlivé složky řezné spáry, a to plyny, řezaný kov a tekutá struska. Spalováním je myšlena chemická reakce ohřátého železa (Fe) s vysokým tlakem kyslíku (O). Oxidací železa mohou vzniknout tři oxidy železa, především Fe_3O_4 , dále FeO , Fe_2O_3 . Při spalovacím procesu vzniká teplo, které je přenášeno do dalšího objemu materiálu a předehřívá ho. [5, 7, 8]



Obr. 1 – Princip tepelného dělení materiálu plamenem. [5]

Rovnováhu procesu není možné zajistit, jelikož dělení probíhá rychle. Jako první dojde k oxidaci Fe na FeO . Další částí je pak vyfukování oxidace nespotřebovaných O_2 na Fe_2O_3 a Fe_3O_4 . Chemické vzorce pro tyto oxidační reakce jsou následující: [7, 9]

1. $\text{Fe} + \text{O}_2 = \text{FeO}$ $H = 270 \text{ kJ}$
2. $3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$ $H = 1\,100 \text{ kJ}$
3. $2\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3$

Druhá z výše uvedených reakcí produkuje největší teplo v procesu řezání. Kov z řezu je odstraňován z části také nezoxidovaný nebo částečně zoxidovaný, kinetickou energií proudu kyslíku. Asi 30 % vyfouknutého materiálu je nezoxidováno. Aby bylo dosaženo dostatečně kvalitních řezů, je nutné používat řezací kyslík o čistotě minimálně 99,3 %. [7]

Při tomto procesu řezání probíhá jako u svařování deformační a teplotní cyklus. Když je ve svařitelné konstrukční oceli nízký obsah vměstků a nenastala velká segregace, není tato ocel náchylná ke vzniku trhlin. U ocelových plechů, které byly tvářeny za studena, můžeme očekávat vznik trhlin v nauhličené oblasti. Nejdůležitějším faktorem vzniku trhlin je rychlost ochlazování. [7, 9]

2.2.1.2. Řezatelnost plamenem (kyslíkem)

Řezatelnost materiálu kyslíkem je omezena principem oxidace kovu. Pro tepelné dělení materiálu kyslíkem, musí být splněny následující podmínky: [9]

- Teplota tání materiálu musí být vyšší než zápalná teplota materiálu.
- Oxidy kovu by měly být tavitelné při nižší teplotě než samotný kov a pod teplotou, která vzniká procesem řezání.
- Teplo, které vzniká, při spalování kovu kyslíkem musí být dostatečné k udržení procesu řezání.
- Snadně tekutá struska, aby nedošlo k brždění řezu. Tzn., že teplota tavení řezaného kovu musí být vyšší než teplota tavení strusky.
- Tepelná vodivost musí být natolik nízká, aby se materiál předehtřival v celé řezné tloušťce minimálně na zápalnou teplotu. Pokud je tepelná vodivost příliš vysoká, proces tepelného dělení nezačne nebo se přeruší.

S použitím předehtřevu se zvyšuje řezatelnost, především u ocelí, které jsou náchylné ke křehkému lomu. U nízkouhlíkových ocelí lze do 50 mm řezat bez použití předehtřevu. Pokud řezeme ocel, která potřebuje předehtřev, bez předehtřevu vzniknou trhliny. Tyto trhliny vzniknou pnutím nebo martenzitickou strukturou. Dalším hlediskem řezatelnosti je také uhlíkový ekvivalent: [7, 9]

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4} \quad [hm \%] \quad (1)$$

V tab. 1 jsou uvedeny teploty ochlazení a předehřevu v závislosti na tloušťce řezaného materiálu a uhlíkového ekvivalentu.

Tab. 1 – Tabulka teplot předehřevu a ohlazování. [7]

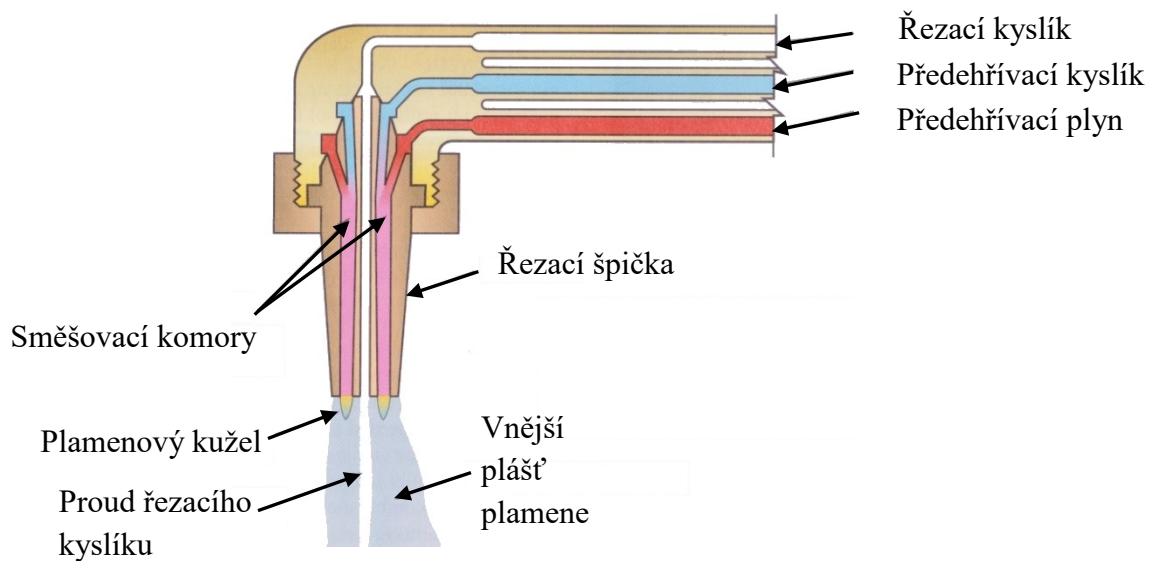
Uhlíkový ekvivalent C_e	Teplota předehřevu T_p [°C]		Ochlazení
	Tenké plechy	Tlusté plechy	
< 0,35	-	-	Na klidném vzduchu
0,35 – 0,4	-	Do 100	
0,4 – 0,5	Do 100	100 – 200	V peci
0,5 – 0,6	100 – 200	200 – 300	
> 0,6	200 – 300	350 – 500	

2.2.1.3. Zařízení pro tepelné dělení plamenem

Řezací hořáky

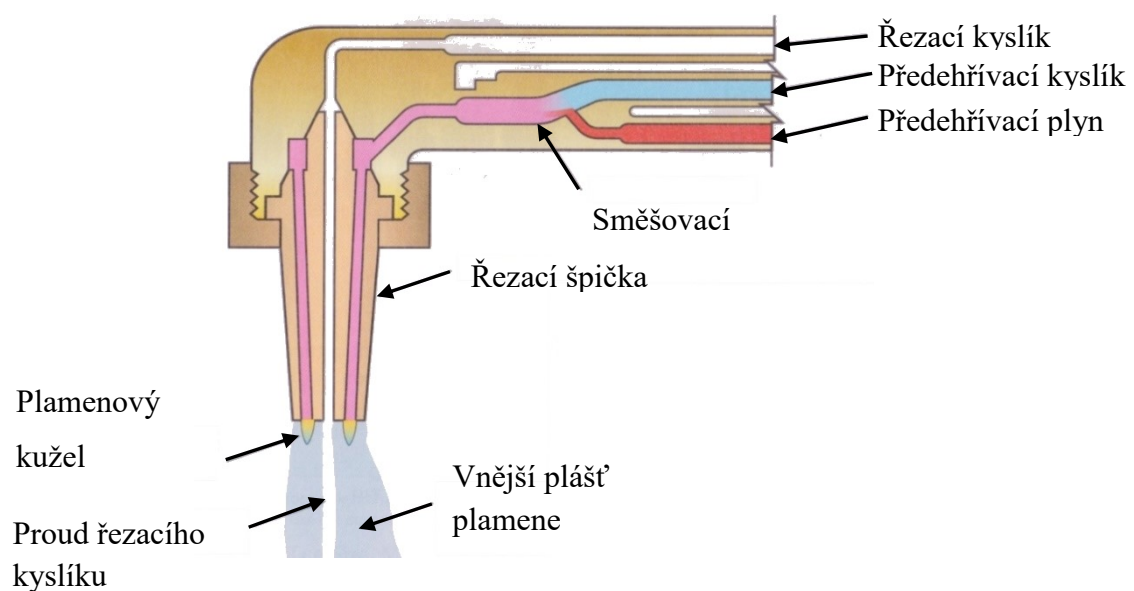
Předehřívací plyn je směs kyslíku s palivovým plynem (např. propan, zemní plyn, butan, nejčastěji acetylen) k dosažení předehřívacího plamenu vysoké teploty. Tyto dva plyny musí být zcela promíchány, než opustí špičku a vytvoří plamen. Běžně jsou používány ruční a strojní hořáky. Při ručním řezání se nejčastěji používají hořáky, kde se mísí předehřívací plyn ve špičce nebo v těle hořáku (obr. 2) a pro strojní je využívána injektorová (vstřikovací) konstrukce hořáku (obr. 3). [7, 8]

Nedílnou součástí „směšovacího hořáku“ (obr. 2) je směšovací komora. Plyny musí vstupovat do hořáku pod stejným vysokým tlakem. Větší velikost míchací komory způsobí turbulenci a dojde k důkladnému promísení plynů. [8]



Obr. 2 - Konstrukce hořáku se směšovacími komorami ve špičce. [8]

Injektorová konstrukce (vstřikovací, obr. 3) pracuje na principu venturiho trubice, kterou prochází kyslík. Tato trubice vytvoří oblast s nízkým tlakem, která „přitahuje“ palivové plyny a mísí je dohromady. Tento typ hořáku se používá v případě použití nízkotlakého generátoru přehřívacího plynu. [8]



Obr. 3 – Konstrukce injektorového (vstřikovacího) hořáku. [8]

Řezací trysky

Trysky (řezací špičky), které jsou připevněny k tělu hořáku, jsou většinou vyrobeny ze slitiny mědi. Některé trysky jsou chromované. Pochromováním trysky se zabrání lepení rozstříku kovu na špičku a prodlouží se její životnost. Existuje více druhů trysek podle výrobce a použití. Na obr. 4 je znázorněna tryska pro rovný řez a vysokorychlostní řezání. K rychlejšímu pohybu hořáku je zapotřebí vysokorychlostní trysky s vyšším tlakem řezacího kyslíku. Tloušťka materiálu, která je možná dělit, se určuje průměrem středového řezacího otvoru (kyslíkový otvor) trysky. Větší průměr kyslíkového otvoru je pro řezání materiálu větších tlouštěk. [7, 8]



Obr. 4 – Konstrukce trysek v řezu. [8]

Regulátor tlaku

Regulátor snižuje vysoký tlak na tlak pracovní. Regulátory musí udržet konstantní tlak v rozsahu průtokových rychlostí. Existuje několik typů regulátorů tlaku, např. jednopákové, dvoustupňové, regulátory nízkého a vysokého tlaku. Přestože všechny uvedené regulátory pracují na stejném principu, nejsou vzájemně zaměnitelné. Při záměně regulátorů hrozí ohrožení bezpečnosti požárem nebo dokonce i výbuchem. [8]

Dále pak mohou být tlakové regulátory vybavené jedním nebo dvěma manometry. Jeden zobrazuje tlak v zásobníku a druhý pracovní tlak. Zobrazený pracovní tlak je tlak v regulátoru a je jiný od tlaku v hořáku. Tlak v hořáku je vždy nižší než tlak v regulátoru z důvodu odporu průtoku plynu, tzv. pokles tlaku v potrubí. [8]

Zpětný ventil

Úkolem zpětného ventilu je zabránění náhodnému proudění plynů v hořáku a proudění do nesprávné hadice. Pokud se nepoužívá zpětný ventil, může dojít k mísení plynů v hadicích, regulátoru, s následnou možnou explozí. Principem tohoto ventilu je kulička s pružinou, která se při zpětném toku plynu zmáčkne a zabrání proudění směrem zpět.

Některé hořáky jsou opatřeny zpětným ventilem, pokud ne, musí být ventil přidán na konec hořáku nebo hadice. [8]

Hadice

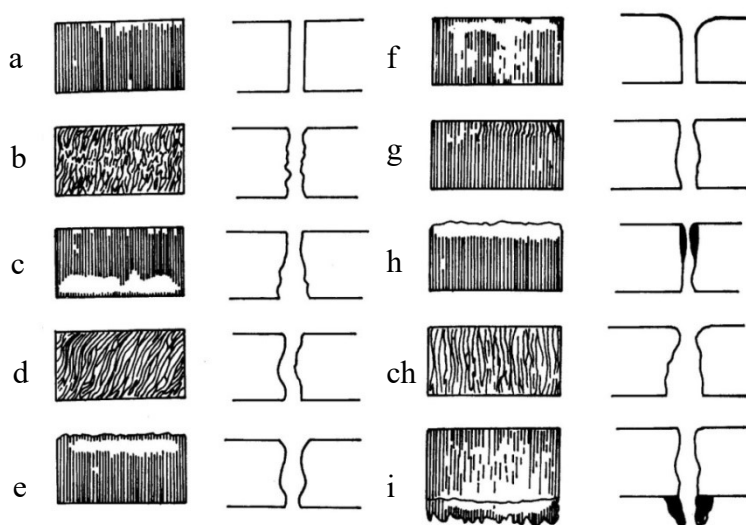
Kyslíkové hadice mají zelenou barvu s pravotočivým závitovým spojem a palivové plyny (acetylen, propan, apod.) mají hadici červenou s levotočivým závitovým spojem. Hadice jsou rozdělovány podle vnitřního průměru na čtyři velikosti, a to 4,6 mm, 6 mm, 8 mm a 10 mm. Hadice s menšími průměry jsou flexibilnější a používají se spíše pro detailní řezy. Větší průměry hadic mají menší odpor průtoku plynu, mohou se používat při větších délkách hadic. Kování na hadice je vyráběno ve třech velikostech, A – malé, B – standardní a C – velké. [8]

2.2.1.4. Poruchy a chyby při tepelném dělení plamenem

Během procesu tepelného dělení materiálu plamenem mohou nastat chyby na samotném plameni nebo na řezných plochách.

Chyby na řezných plochách

Na obr. 5 jsou vyobrazeny chyby, které mohou vzniknout na řezných plochách. Na obr. 5 – a je ideální řez. V tab. 2 jsou vypsány chyby včetně jejich příčin. Zmíněné chyby jsou vyobrazeny na obr. 5.



Obr. 5 – Chyby na řezných plochách. [10]

Tab. 2 – Chyby a příčiny na řezných plochách. [10]

Obr. 5	Chyba	Příčina
b	Deformované a drsné řezné plochy	Pohyb hořáku je nerovnoměrný
c	Dolní části řezných ploch jsou natavené	Řezná rychlost je malá
d, e	Řezné plochy jsou vypálené středem	Řezná rychlost je velká, řezací kyslík má velký tlak
f	Řezné hrany jsou odtavené, řezná plocha je vypalována	Hořák je daleko od povrchu řezaného materiálu
g	Řezné hrany jsou natavené	Hořák je příliš blízko povrchu řezaného materiálu
h	Horní řezné hrany jsou opálené	Nahřívací plamen je velký
ch	Dolní část řezu je zvětšená	Řezací hubice kyslíku je znečištěná
i	Struska zatahuje dolní část, řezná plocha je vypalována	Řezná rychlost je malá, kyslík je znečištěný

Chyby na plamenu

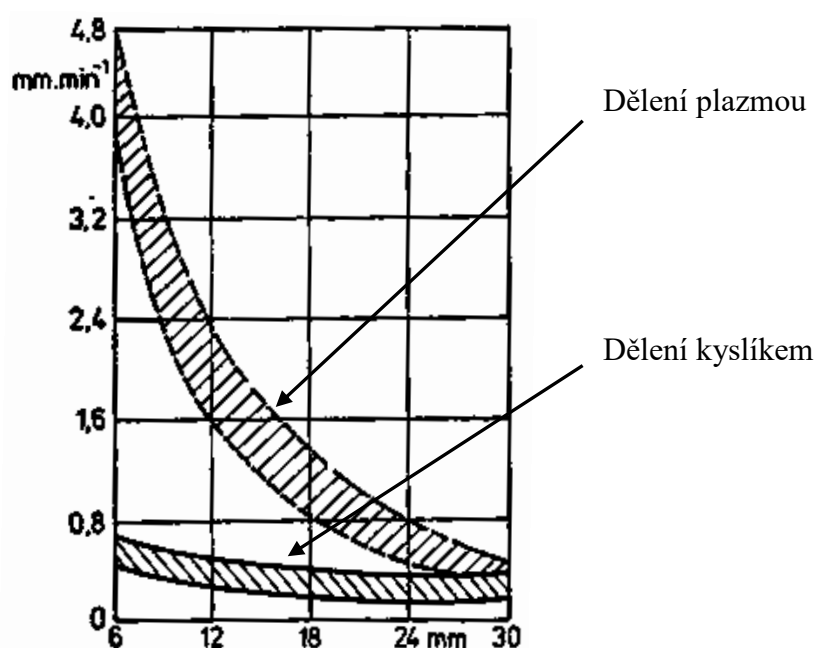
Tab. 3 obsahuje chyby, které se mohou vyskytnout na plamenu, včetně jejich příčin.

Tab. 3 – Chyby a příčiny na plamenu. [10]

Chyby	Příčiny
Plamen, který hoří vně hořáku	Hořák je velmi ohřátý, špičky nejsou dostatečně utáhnuté a plamen pro předehřev je blízko k řezanému materiálu
Hořák vystřeluje při zapalování	Nízký tlak kyslíku, ventil kyslíku může být zamrzlý
Nemožnost zapálení předehřívacího plamenu	Tlak kyslíku je vysoký, proudění plynu je špatné
Předehřívací plamen hoří špatně	Málo hořlavého plynu, může být ucpaná tryska

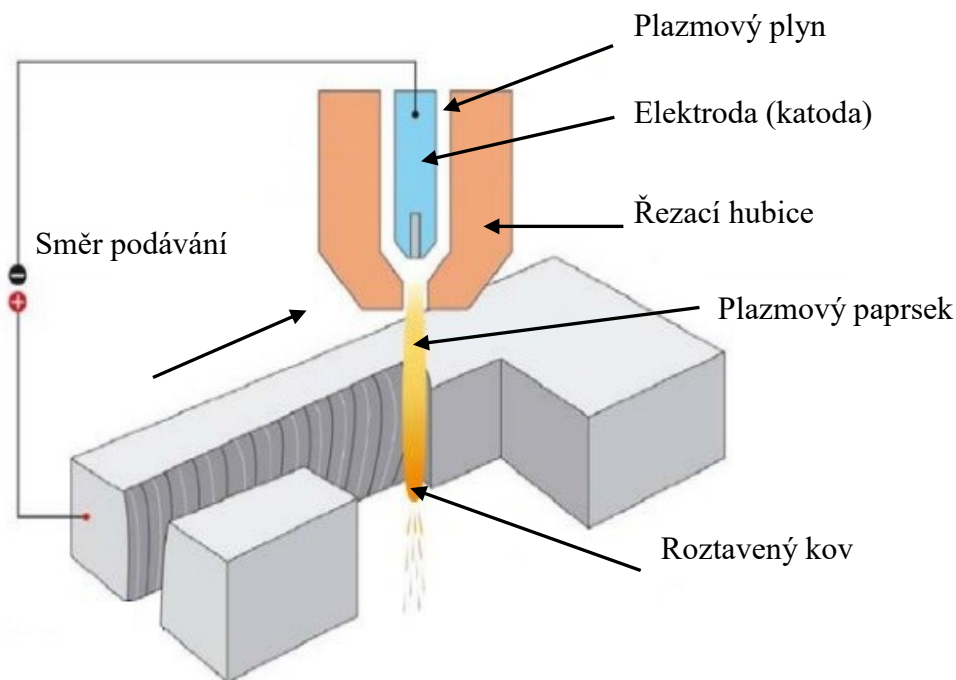
2.2.2. Dělení plazmou – 83

Tato metoda tepelného dělení je velice vhodná pro ocel o středních tloušťkách. K dosažení optimální kvality řezné hrany, podle řezacího proudu, se doporučuje řezat materiály v rozmezí 3 až 40 mm. Oproti metodě tepelného dělení plamenem dokáže plazma řezat mnohem rychleji, avšak kvalita řezných hran je menší. Ve srovnání s plamenovým dělením je vybavení pro tepelné dělení plazmou drahé. Avšak drahé pořizovací náklady se mohou vrátit téměř ihned, produktivita řezání plazmou je mnohem vyšší než u řezání plamenem. Rychlost dělení plazmou je v porovnání s plamenem velká (obr. 6). [5, 6]



Obr. 6 – Rozdíl rychlosti řezání plazmou a kyslíkem. [5]

Při dělení plazmou se jako zdroj tepla používá zúžený stabilizovaný elektrický oblouk, který hoří mezi netavící se wolframovou katodou a anodou. Na obr. 7 je znázorněný princip tepelného dělení plazmou. Anodu tvoří těleso hořáku nebo řezaný materiál. Principem této metody je nahlátí materiálu na vysokou teplotu (nad teplotu tavení) a následným odstraněním materiálu z místa řezu. K odstranění roztaveného materiálu z místa řezu se používá ionizovaný plyn, který má vysokou teplotu. K nejčastějším plazmovým plynům řadíme jednoatomový argon nebo dvouatomové plyny dusíku, vodíku, vzduchu a kyslíku. [5, 8]



Obr. 7 – Schéma tepelného dělení plazmou. [12]

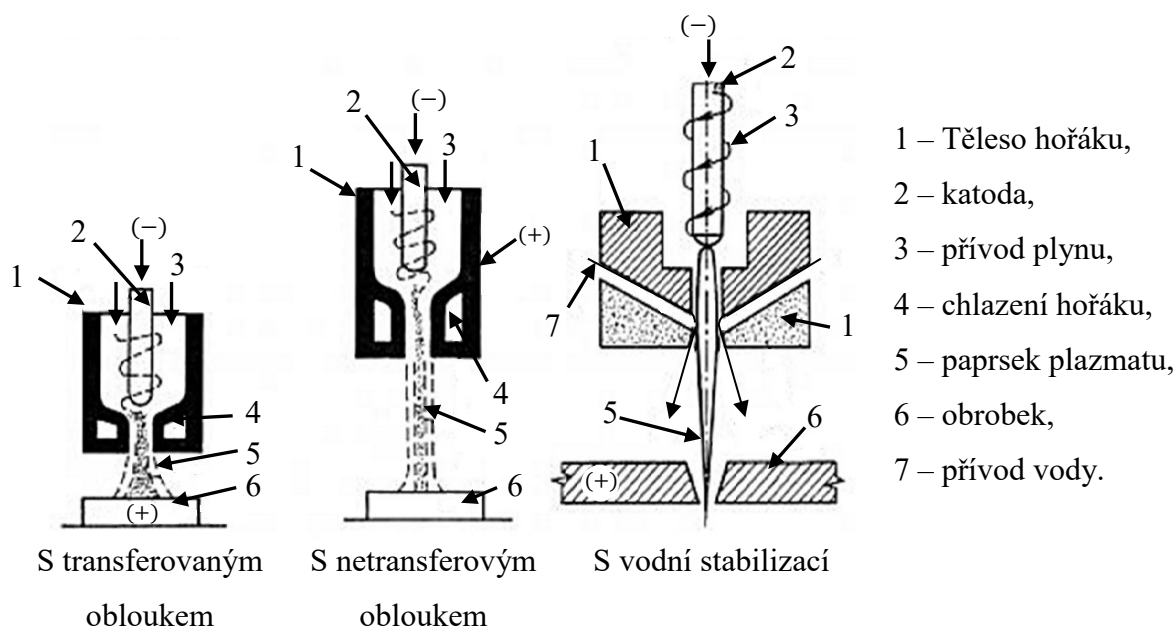
2.2.2.1. Fyzikální princip vzniku plazmy

Pod pojmem plazma si můžeme představit elektricky vodivý plyn, který je vysoce žhavý. Plazma se skládá z negativních a pozitivních iontů, elektronů. Dále obsahuje vybuzené neutrální atomy a molekuly. Pro vzniknutí plazmy je nutná ionizace plynu. Ionizace plynu je mechanická nebo tepelná. Při ionizaci plynu se z vnějších valenčních orbitů atomů uvolňují nebo vyzařují elektrony se záporným nábojem, které vedou elektrický proud v plazmě. Kladný náboj má ionizované jádro atomu, tzn. iont se zbývajících elektronů. Pokud je použitý plyn dvouatomový (vodík, dusík, vzduch a kyslík) musí dojít jako první k rozložení molekul plynu na atomy – tzv. disociace plynu. Zdrojem potřebné energie je nejčastěji elektrický oblouk. Pokud zvýšíme teplotu oblouku, dojde ke zvýšení stupně ionizace, to znamená, že je stupeň ionizace závislý na teplotě oblouku a při teplotách kolem 100 000 K, nastává úplná ionizace. Při procesu dělení, svařování jsou dosahované teploty hodně nižší. Chladnější část plynu neboli jeho neionizovaná část stabilizuje paprsek plazmy v ose hořáku a zabrání paprskům dotknutí stěn trysky. [8, 11]

2.2.2.2. Zařízení pro tepelné dělení plazmou

Plazmový hořák

Plazmový hořák vytváří a usměrňuje plazmu pro proces řezání nebo svařování, tzv. dochází k přeměně elektrické energie na energii usměrněného proudu plazmatu. Jedním z klíčových parametrů hořáku je jeho stabilizace elektrického oblouku. Plazmové hořáky se dělí podle druhu použitého stabilizačního média (obr. 8) na plazmové hořáky s vodní stabilizací a plazmové hořáky s plynovou stabilizací. [8, 13]



Obr. 8 – Typy plazmových hořáků. [13]

Hořák s plynovou stabilizací (obr. 8) – Plazmový hořák s plynovou stabilizací má dvě provedení, a to: [13]

- Netransferovaný oblouk – mezi vnitřní elektrodou, která je umístěna v hořáku, a výstupní tryskou hoří elektrický oblouk. Výstupní tryska je anoda. Tento oblouk nalezne uplatnění v obrábění, dělení nevodivých materiálů i k nanášení povlaků.
- Transferovaný oblouk – mezi vnitřní elektrodou, která je umístěna v hořáku, a obráběným materiálem hoří elektrický oblouk. Anodou je obráběný materiál. Tento typ oblouku se uplatňuje v obrábění, dělení elektricky vodivých materiálů, jako jsou například oceli a neželezné kovy.

Hořák s vodní stabilizací (obr. 8) – U tohoto typu stabilizace má řezací tryska přídavné kanálky. Kanálky slouží k přivádění vody do plazmového hořáku. Velkou předností hořáku s vodní stabilizací je možnost řezání pod vodou, kde dochází ke snížení prašnosti, hluchosti a dojde k omezení vlivu UV záření na obsluhu. Hořák s vodní stabilizací se používá pro řezání neželezných kovů, ocelí a pro nanášení povlaků. [13]

Chladicí systém

Tento systém se skládá z vodního čerpadla, zásobníku pro chladicí kapalinu a hadic pro přenášení této kapaliny k hořáku a zpět. Zásobník kapaliny by měl mít indikátor hladiny ke kontrole stavu hladiny. Některé systémy jsou vybaveny blokovacím systémem. Tento systém zastaví hořák, v případě nízké hladiny chladicí kapaliny. Jako chladicí kapalina se používá deionizovaná voda – neobsahuje částice, které mohou ucpat otvory uvnitř hořáku. Pokud dělení probíhá za snížených teplot a hrozí zamrznutí kapaliny, používá se vhodná nemrznoucí směs. [8, 9]

Hadice a napájecí kabely

Pro dělení plazmou je potřeba kromě plynových hadic také napájecí kabely pro elektrický oblouk a hadice pro chladicí systém. Plynová hadice a napájecí kabely jsou obvykle vyrobené jako jeden kabel, který je povlečen krycí vrstvou. Tato krycí vrstva slouží k ochraně hadic a kabelu proti případnému kontaktu s horkým kovem, jiskření nebo také proti mechanickému poškození. [8, 9]

Plynové hadice – K většině hořáků je připojena jedna hadice, u některých hořáků jsou dvě hadice. Jedna hadice přepravuje plyn na výrobu plazmatu a druhá ochranný plyn. Hadice musí být správně dimenzována pro zvládnutí přenosu požadovaného průtoku plynu a nesmí obsahovat oleje a rozpouštědla, které mohou kontaminovat plyn. Vždy při výměně hadice je nutné použít hadici dodanou výrobcem zařízení. [8, 9]

Napájecí kabel – Má vysokonapěťovou izolaci a je vyrobený z jemně splétaného měděného drátu, z důvodu flexibility hořáku – s většími kabely se hůře manipuluje. Ke zvýšení kapacity zařízení musí být kabel dostatečně velký, pro přenos zvýšeného proudu. U vodou chlazených hořáků lze napájecí kabel umístit do zpětné linky chladicí vody. Kabel se ve vodě nebude přehřívat a bude schopen přenášet větší proud. [8, 9]

Chladicí hadice – Jsou vyrobeny z materiálu, který je pružný, odolný vůči ultrafialovému záření a vysokým teplotám. Stejně jako u plynových hadic, i tyto musí být správně dimenzovány pro přenos potřebného objemu chladicí kapaliny, k zabránění přehřátí hořáku. [8, 9]

2.2.2.3. Používané plyny

V dnešní době se používá téměř jakýkoli plyn, směs plynů pro proces dělení plazmou. Změna plynu nebo směsi plynů je jedna z možností, jak kontrolovat a řídit plazmový řez. Příklad účinku změny plynu na řez: [8]

- Plyny s kompaktnějším plazmovým proudem – ovlivní šířku řezu a řeznou rychlost.
- Změna elektrického odporu plynu – ovlivní teplo produkované plazmou. Čím je vyšší odpor plynu, tím vyšší je teplo produkované plazmou.
- Některé plyny mohou pozitivně ovlivnit kompaktnost proudu plazmatu – hlubší řez s menšími úkosy po stranách.
- Dále je také možné změnou plynu předejít tvorbě strusky na spodní hrany řezu nebo tvorbě zaoblených horních hran.

Plazmový plyn

Jako plazmový plyn se používá jednoatomový argon, je možné použít i dvouatomové plyny kyslíku, dusíku, vodíku a vzduchu. Tyto plyny jsou dodávány do elektrického oblouku, kde dojde k jejich disociaci a ionizaci. Plazmový plyn se volí dle tloušťky a typu děleného materiálu. Např. pro konstrukční ocel se volí kyslík nebo vzduch, pro neželezné kovy vzduch nebo směs argonu a vodíku. [8, 13]

Asistenční plyn

Jako asistenční plyn se používá argon a dusík. Slouží k ochraně paprsku před účinkem atmosféry tak, že obklopí paprsek plazmy a místo působení paprsku na obrobek. Volba tohoto plynu je stejná jako u plazmového plynu. [13]

Fokusační plyn

Jako fokusační plyn se používá dusík, argon, směs vodíku a argonu a směs dusíku a argonu. Tyto plyny plní funkci zaostřování paprsku plazmatu po jeho výstupu z trysky hořáku. [13]

2.2.2.4 Chyby při tepelném dělení plazmou

V tab. 4 jsou vypsané nejčastější chyby, které mohou vzniknout na řezných plochách, včetně jejich příčin při použití metody tepelného dělení plazmou.

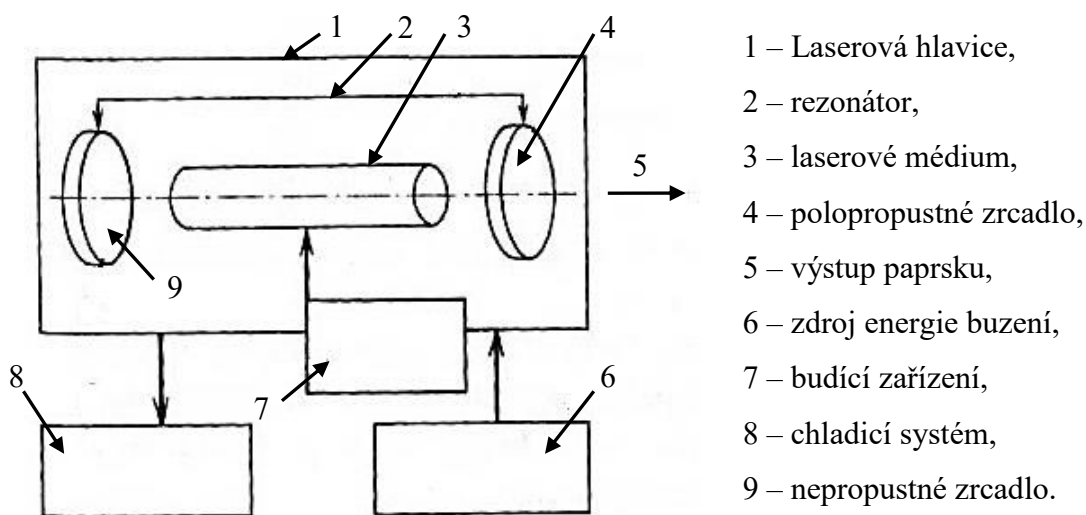
Tab. 4 – Chyby a příčiny při dělení plazmou. [14]

Chyba	Příčina
Horní a spodní hrany řezu jsou zaoblené	Velký elektrický proud, překročení výkonu
Horní hrana je podpálená	Hořák moc blízko k dělenému materiálu
Spodní rozměr součásti je menší než horní – tzv. negativní úhel	Rychlost řezání je nízká, oblouk má nízké napětí, hořák je špatně nastaven, spotřební materiály mohou být opotřebeny nebo řezaný materiál může být zvlněný
Spodní rozměr součásti je větší než horní – tzv. pozitivní úhel	Rychlost řezání je vysoká, oblouk má vysoké napětí, hořák a elektrický oblouk je špatně nastaven, spotřební materiály mohou být opotřebeny nebo řezaný materiál může být zvlněný
Struska na povrchu	Rychlé řezání, vysoké napětí oblouku
Kapky strusky na spodní straně řezu	Pomalé řezání, malé napětí oblouku
Na spodním povrchu řezaného materiálu je rozprostřena/natavena struska	Rychlé řezání, vysoké napětí oblouku
Nesoudržné nepravidelnosti na povrchu řezné plochy nejčastěji ve směru jedné osy	Pohyb zařízení – koleje stroje jsou nerovnoběžné, neočištěné pastorky, kola nebo opotřebovaná popř. poškozená ložiska, kola
Soudržné nepravidelnosti na povrchu řezné plochy pouze ve směru jedné osy	Chyby procesu – vysoký průtok plynu, spotřební materiály jsou poškozené nebo opotřebované

2.2.3. Dělení laserem – 84

Tato metoda tepelného dělení materiálu je používána pro ocel do tloušťky 30 mm, je velmi přesná s minimální zoubkovatostí řezné plochy, s minimálním vznikem strusky a kvalita hrany je často značně dobrá. Dělení laserem využívá extrémní žár, který je vytvořen soustředěným laserovým paprskem, ke spalování materiálu. Důležitým faktorem je chemická reakce mezi kyslíkem a děleným materiálem, která omezuje rychlost řezání. Laserem se dají řezat i velmi přesné tvary a otvory malých rozměrů, jelikož vzniklý řez je velmi úzký. Mezi přednosti laseru řadíme automatizaci, kde je možné dělit téměř bez dozoru a vysokou životnost spotřebního materiálu. [6]

Termín laser je zkratka pro „light amplification by stimulated emission of radiation“. Tato zkratka se překládá jako zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Principem laseru je přeměna světelné energie na tepelnou energii. Stimulovaná emise – na atom prvku dopadne záření. Toto záření přinutí elektron, který obíhá kolem jádra, přijmout energii. Elektron, který přijal energii, vystoupá na vyšší oběžnou dráhu. Dále je elektron přinucen vrátit se na svou prvotní oběžnou dráhu, z důvodu rovnováhy sil v atomu a dalšího příjmu energie. Elektron po vrácení na svou prvotní oběžnou dráhu vyzáří přijatou energii do prostoru. Tvar vzniklého záření má jednu vlnovou délku, která je přesně definovaná – tzn. záření je monochromatické. Fotony, které jsou ve svazku, jsou v průřezu rozděleny pravidelně nebo stejnosměrně a pohybují se jedním směrem. [8, 15]



Obr. 9 – Schéma zařízení pro obrábění laserem. [15]

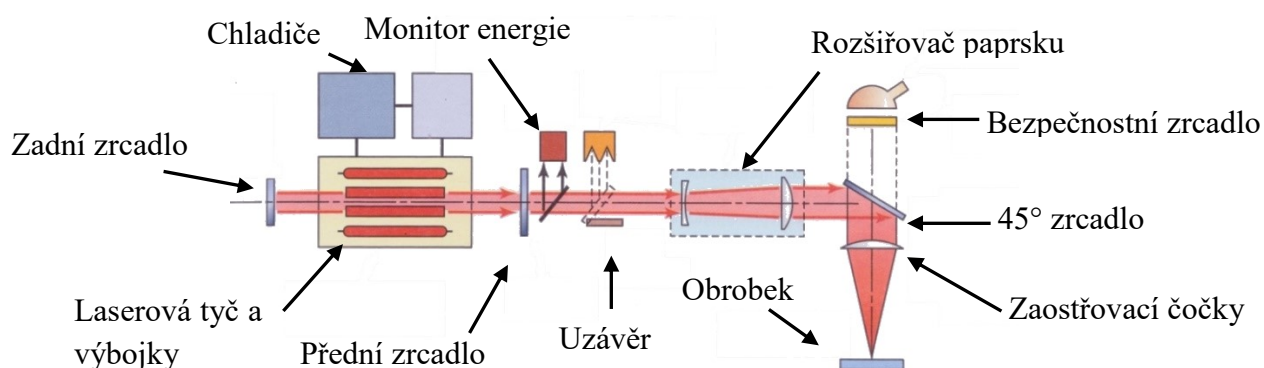
2.2.3.1. Typy laserů

První typy laserů používaly jako materiál produkující laserové světlo rubínovou syntetickou tyč. V dnešní době se pro výrobu používají materiály jako je sklo, neodymem dopovaný, yttrium hliníkový granát (Nd: YAG), který se velmi často označuje jako YAG laser. Lasery můžeme rozdělit na pevnolátkové, diodové (polovodičové) a plynové. Dále se dělí na dva typy pracovního způsobu, a to na pulzní a laser, který pracuje nepřetržitě (kontinuální). [8, 15]

Pevnolátkové lasery

U těchto typů laserů je jako aktivní prostřední používaná pevná látka, která je opticky propustná – dielektrikum. Jako základní materiál musí být matrice, kterou je možné uměle vyrábět. Matrice je opticky homogenní a průhledná. Nejpoužívanějším pevnolátkovým laserem je v dnešní době Nd: YAG laser, kde neodymem dopovaný, yttrium hliníkový granát je syntetický krystal, který produkuje velké množství laserové energie, z důvodu vystavení intenzivnímu světlu ze zábleskové trubice. [8, 15]

- Nd: YAG laser (obr. 10) – používá se pro svařování, vrtání, žíhání a dělení. Vlnová délka tohoto laseru je $1,06 \mu\text{m}$ a jeho výkon je v rozmezí 100 až 4 000W. Umí pracovat v obou režimech, v pulzním i kontinuálním.
- Nd: sklo laser – pracuje pouze v režimu pulzním. Nejčastěji se používá u termionukleárních systémů.
- Rubínový laser – je v dnešní době často nahrazován Nd: YAG laserem. Pracuje nejčastěji v režimu pulzním. Používá se u tvrdých materiálů, např. vrtání. Vlnová délka je $0,6943 \mu\text{m}$.
- Dále pak Er: YAG laser, Nd: YLF laser, apod. [15]



Obr. 10 – Schéma ND: YAG laseru. [8]

Plynové lasery

Tento typ využívá jeden nebo více plynů. Nejčastěji používaným plynem je hélium, dusík, oxid uhličitý (CO_2) nebo jejich směsi. Pracují nejčastěji v kontinuálním režimu, ale také jsou plynové lasery, které mají vysoký výkon, pracující v pulzním režimu. Buzení nastává chemickou reakcí, fotodisociací, elektrickým výbojem, opticky, rychlou expanzí plynu nebo průchodem svazku elektronů. [8, 15]

- Argonový laser – u tohoto typu laseru tvoří ionty argonu aktivní prostředí. K buzení se používá elektrický výboj.
- CO_2 laser – Molekuly oxidu uhličitého tvoří aktivní prostředí. K buzení dochází pomocí elektrického výboje. Nejčastěji se využívá pro svařování, dělení, popis součástí, tepelné zpracování, nanášení povlaků a vrtání.
- Helium neonový laser, excimerový laser, apod. [15]

Diodové (polovodičové lasery)

U diodových laserů se používá jako aktivní prostředí polovodičový materiál. Aktivními částicemi v polovodičovém materiálu jsou volné nosiče náboje – díry a nerovnovážné elektrony. Tyto volné nosiče náboje pak mohou být injektovány. Mezi přednosti řadíme jejich účinnost, která je až 50 % a kompaktnost. Mezi nevýhody řadíme to, že parametry generovaného záření jsou velice závislé na teplotě aktivního polovodičového materiálu a generované záření je rozbíhavé. Nejčastější uplatnění je pak v dělení, svařování a popisování součástí. [15]

- Injekční polovodičový laser – Složení polovodičů typu N a P tvoří aktivní prostředí. K buzení se používá elektrické pole, které se přiloží k polovodičovému přechodu P-N. Za současného emisního záření se rekombinují díry a elektrony v přechodu P-N. Samotné laserové záření pak vzniká odrazem od zrcadel otevřeného rezonátoru, tvoří ho vybroušené strany polovodičového materiálu, a mnohonásobným přechodem oblastí přechodu.
- Diodový laser – je buzený svazkem elektronů, fotony nebo elektrickým polem. Bloky polovodičů tvoří aktivní prostředí. V polovodičovém bloku pak procházejí rychlé elektrony, které vyvolávají přechody z pásu valenčního do vodivostního pásu. [15]

2.2.3.2. Metody dělení laserem

Tavná metoda

U této metody dojde v místě řezu k natavení materiálu s následným odfukem asistenčním plynem. Používá se pro nekovové materiály – dřevo, plasty, keramika, sklo a textilní materiály. [16]

Sublimační metoda

Princip spočívá v tom, že v místě řezu vzniká vysoká intenzita záření a tím dochází k odstraňování materiálu odpařováním, patří mezi méně používané. [12, 16]

Pálící metoda

Materiál je pomocí paprsku laseru přiveden na zápalnou teplotu a přívodem reaktivního plynu, např. kyslík, shoří v exotermické reakci. Používá se také asistenční plyn, který odstraňuje vzniklou strusku. Nejčastěji se používá pro dělení titanu, korozivzdorných ocelí a pro oceli s nízkým obsahem uhlíku. [16]

2.2.3.3. Řezatelnost a základní charakteristiky procesu

Řezatelnost

V případě laseru je řezatelnost závislá na světelné absorpci materiálu. Dobře řezatelné jsou materiály, které absorbují svazek laserového záření docela dobře, např. nekovové materiály, jako je pryž, keramika, dřevo, apod. Kovové materiály mají horší absorpci, proto se řezání takovýchto materiálů podporuje přídavným kyslíkem. V případě dělení materiálu jako je hliník, měď, které mají vysokou odrazivost světelného záření, je řezatelnost velmi slabá. [5]

Základní charakteristiky

- Kvalita řezu – dosahuje se R_a v rozmezí 3,6 až 12 μm a TOO bývá v rozmezí mezi 0,05 až 0,2 mm.
- Šířka řezné spáry – dle děleného materiálu a druhu laseru bývá v rozmezí 0,02 až 0,2 mm.
- Rychlost řezání – je dána dle druhu děleného materiálu, požadavků na kvalitu řezu, závisí na způsobu řezání a výkonu paprsku laseru. [16]

3. Experimentální část práce

V praktické části bylo provedeno 7 zkušebních vzorků z ocelí jakosti S690QL (N-A-XTRA M700, DILLIMAX690T). První čtyři vzorky byly zhotoveny s parametry dělení běžně používanými při výrobě daných typů výpalků v souladu s normou ČSN EN ISO 1090 – 2: A1. Další tři vzorky byly optimalizovány pro danou zakázku výpalků dle požadavků zákazníka na docílení lepšího povrchu řezné hrany. Zlepšením povrchu řezné hrany se předejde následné úpravě plochy od nerovností, např. broušením. Pálicí stroj byl použit Suprarex SXE – P3 (obr. 11) od firmy ESAB. [17]



Obr. 11 – Pálicí stroj Suprarex SXE – P3.

3.1. Základní materiály použité pro pálení vzorků

Jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tab. 5, včetně jejich tloušťek a materiálu. Chemické složení (rozbor tavby) jednotlivých materiálů, které splňuje normu ČSN EN 10025 – 6 + A1 a dále jsou z této normy v tab. 7 vypsány mechanické vlastnosti pro ocel jakosti S690QL. [18]

Tab. 5 – Tloušťky a materiály vzorků.

Vzorek	Tloušťka [mm]	Materiál
1	200	DILLIMAX690T
2	130	S690QL
3; 5-7	75	N-A-XTRA M700
4	30	N-A-XTRA M700

Tab. 6 – Chemické složení (rozbor tavby) materiálů vzorků.

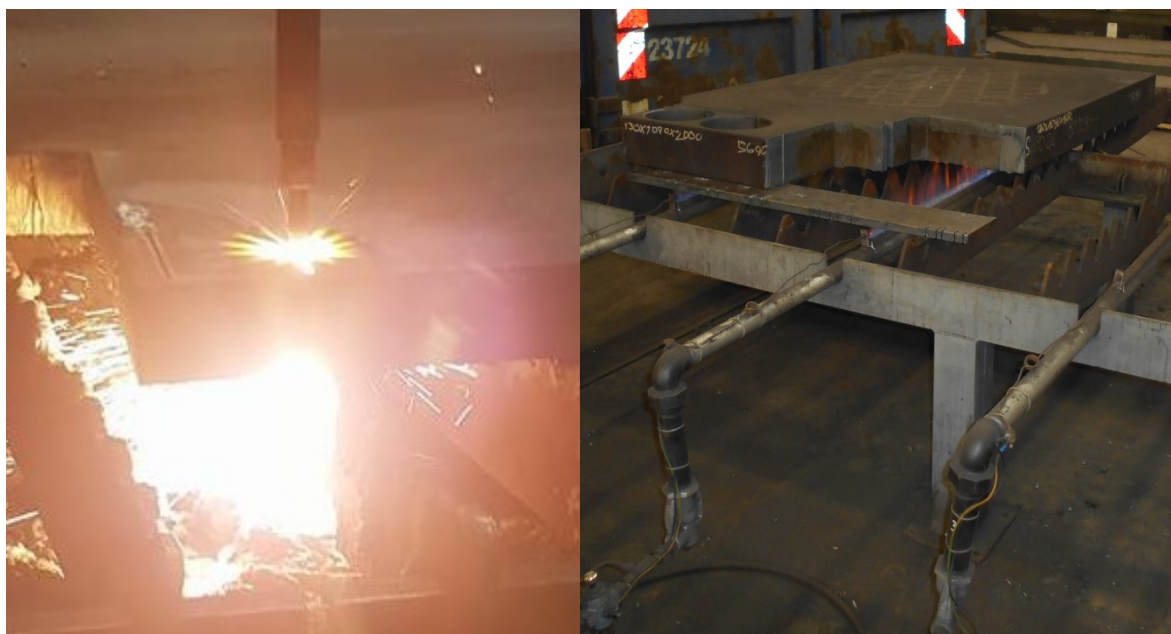
Vzorek	Chemické složení [%]							
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Mo
1	0,169	0,307	1,410	0,012	0,0009	0,0040	0,028	0,415
2	0,163	0,244	0,684	0,011	0,0003	0,0055	0,249	0,418
3; 5-7	0,170	0,240	1,400	0,014	0,0023	0,0040	0,060	0,460
4	0,170	0,190	1,380	0,008	0,0030	0,0060	0,020	0,460
Vzorek	Ni	Cr	V	Nb	Ti	B	Zr	
1	0,713	0,888	0,002	0,029	0,006	0,0018	0,0002	
2	0,133	0,980	0,011	0,001	0,002	0,0020	-	
3; 5-7	0,080	0,330	-	0,029	-	0,0027	-	
4	0,030	0,330	-	0,028	0,004	0,0024	-	

Tab. 7 – Mechanické vlastnosti oceli jakosti S690QL při okolní teplotě. [18]

Jmenovitá tloušťka materiálu	R _{eH} [MPa]	R _m [MPa]	Minimální tažnost [%]
≥ 3 ≤ 50	690	770 - 940	14
> 50 ≤ 100	650	760 - 930	
> 100 ≤ 150	630	710 - 900	

3.2. Pálení

Proces pálení vzorků probíhal na jednom stroji. Vzorky byly páleny bez předehřevu a s předehřevem. Předehřev probíhal na nahřívacím stole nebo pomocí trysky hořáku v místě řezu. Na obr. 12 je v levé části zobrazen proces pálení vzorku plamenem a v pravé části je zobrazen nahřívací stůl pro předehřev. Optimalizace parametrů pálení z hlediska výrobce směřuje k ušetření času a provozních nákladů – pokud je to z technologického hlediska možné, pálení probíhá bez předehřevu. V tab. 8 jsou uvedeny parametry pálení.



Obr. 12 – Proces pálení vzorků a nahřívací stůl.

Tab. 8 – Parametry pálení vzorků.

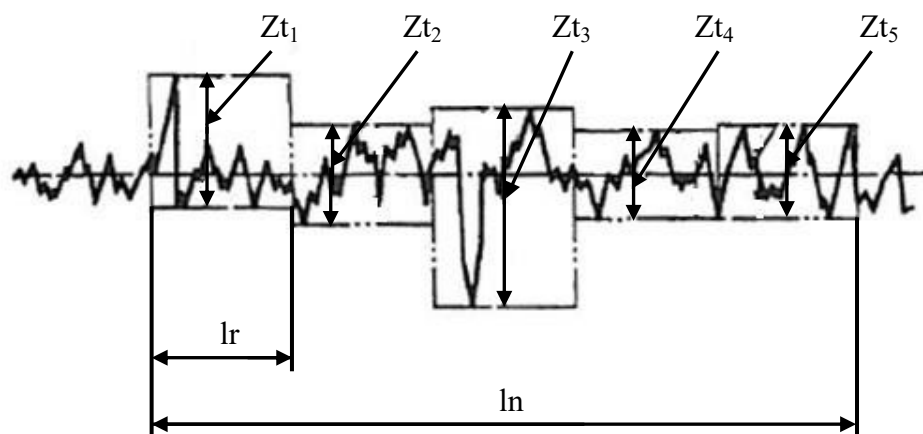
Vzorek	Tryska	Rychlost [mm/min]	Předehřev [°C]	Tlak řezacího kyslíku [Bar]	Vzdálenost trysky [mm]
1	200 - 250	124	230 - 250	8,1	
2	100 - 200	182	250 - 280	7	7,5
3	50 - 100	234	150 - 160	7	
4	25 - 40	348	130	7,3	
5	50 - 100	250	Bez	7,5	
6	50 - 100	250	150	8	6
7	50 - 100	200	Bez	7	6

3.3. Kvalita pálené plochy dle ČSN EN ISO 9013

Kvalita a požadavky na řezné hrany jsou blíže specifikovány v normě ČSN EN ISO 9013, kde je také stanoveno, že před samotným měřením se vzorky musí řádně upravit – očištění strusky z měřených ploch. U měřených ploch se může sledovat např. úchylka kolmosti, průměrná výška profilu Rz5, skluz, apod. [19]

3.3.1. Průměrná výška prvků profilu Rz5

Aritmetický průměr, který se určuje z dílčích výšek prvků profilu, stanovený z pěti po sobě následujících základních délkách l_r (obr. 13), kde hodnota l_n je celková vyhodnocovaná délka a hodnoty Z_{t1} až Z_{t5} jsou jednotlivé prvky profilu. V tab. 9 jsou znázorněny jednotlivá toleranční pole pro výslednou drsnost. [19]



Obr. 13 – Průměrná výška profilu Rz5. [19]

Tab. 9 – Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu Rz5. [19]

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, Rz5 [μm]
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$

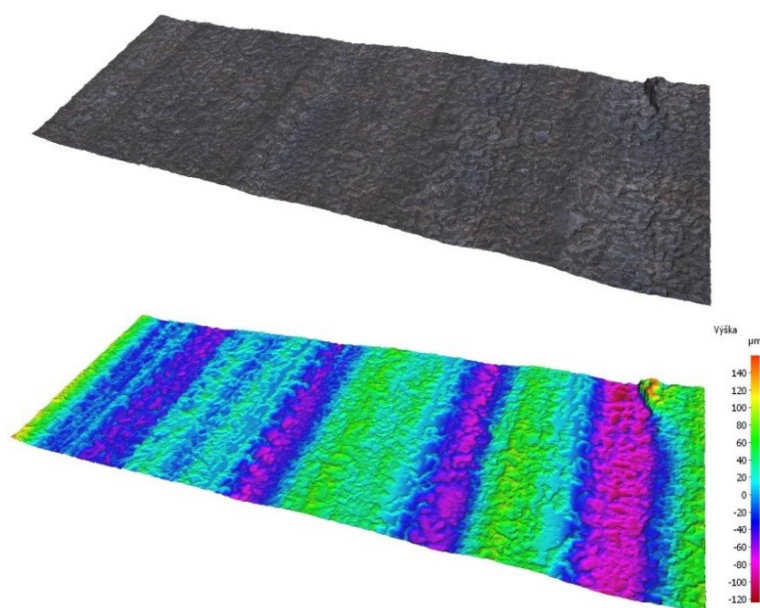
Měření vzorků před optimalizací bylo provedeno přenosným přístrojem na měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ 301. Průměrná výška profilu Rz5 se stanovuje v omezené oblasti řezu. Dle ČSN EN ISO 4288 bylo měření provedeno tam, kde je drsnost povrchu řezné tloušťky maximální. Měření bylo provedeno na úseku 15 mm na každý metr řezu ve směru posuvu hořáku a ve vzdálenosti 2/3 tloušťky od horní hrany řezu. [20]

V tab. 10 jsou uvedeny výsledné hodnoty měření průměrné výšky profilu, které jsou porovnány s tolerancí dle ČSN EN ISO 9013 (tab. 9). [19]

Tab. 10 – Výsledné hodnoty průměrné výšky profilu Rz5 vzorků 1 až 4.

Vzorek	1	2	3	4
Rz [μm]	64,19	57,42	63,59	101,7
Toleranční pole	1	1	2	3

Měření vzorků po optimalizaci bylo provedeno pomocí optického mikroskopu Alicona Infinite Focus, který zachytí topografii povrchu. Měří drsnost ve 2D i 3D. Mikroskop nasnímá měřenou plochu a poté se pomocí softwaru upraví. Dojde k oddělení primárního profilu a tvaru, oddělení drsnosti povrchu od vlnitosti s následným vyhodnocením výsledné drsnosti povrchu Rz. Na obr. 13 je vyobrazená plocha jednoho vzorku včetně barevného spektra. [21]



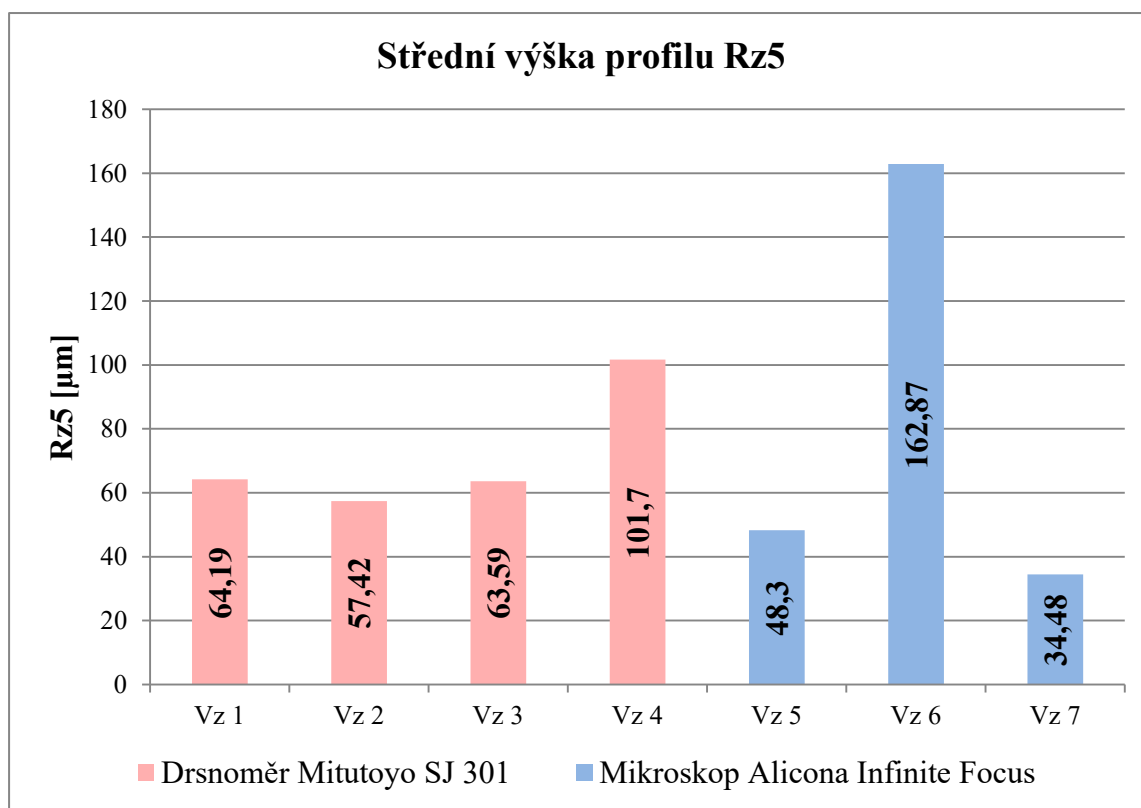
Obr. 14 – 3D pohled na naměřenou plochu.

V tab. 11 jsou uvedeny výsledné hodnoty měření průměrné výšky profilu vzorků po optimalizaci, které jsou porovnány s tolerančním polem dle ČSN EN ISO 9013 (tab. 9). [19]

Tab. 11 – Výsledné hodnoty průměrné výšky profilu Rz5 vzorků 5 až 7.

Vzorek	5	6	7
Rz [μm]	48,30	160,53	34,48
Toleranční pole	1	3	1

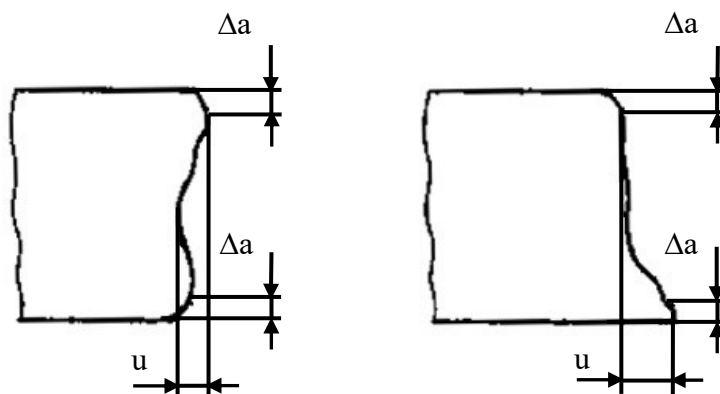
Na obr. 15 je grafické porovnání výsledných hodnot drsnosti povrchu. Z výsledků je patrné, že nejmenší drsnost dosahuje vzorek 7, který byl pálený po optimalizaci řezných parametrů a bez přehřevu. Vzorek 3, 5, 6 a 7 je z jedné jakosti plechu o tloušťce 75 mm, lze si u těchto vzorků všimnout, že při optimalizaci parametrů se podařilo zlepšit drsnost až o cca 50%. Výjimku tvoří pouze vzorek 6, kde je hodnota výsledné drsnosti vysoká.



Obr. 15 – Grafické znázornění výsledů průměrné výšky profilů Rz5.

3.3.2. Úchylka kolmosti (u)

Vyjadřuje vzdálenost mezi dvěma přímkami, které jsou rovnoběžné a dotýkají se řezného povrchu, je mezi ně vepsán profil povrchu řezu (obr. 16). Povrch řezaného materiálu s přímkami svírá stanovený úhel, který je pro případ svislého řezu 90° . V tab. 12 jsou znázorněny jednotlivá toleranční pole pro výslednou úchylku kolmosti. Oblast určování úchylky kolmosti se musí nejprve zmenšit o vzdálenost Δa od spodní a horní hrany pálené plochy (obr. 16). Hodnoty Δa jsou uvedeny v tab. 13. [19]



Obr. 16 – Úchylka kolmosti pro svislý řez. [19]

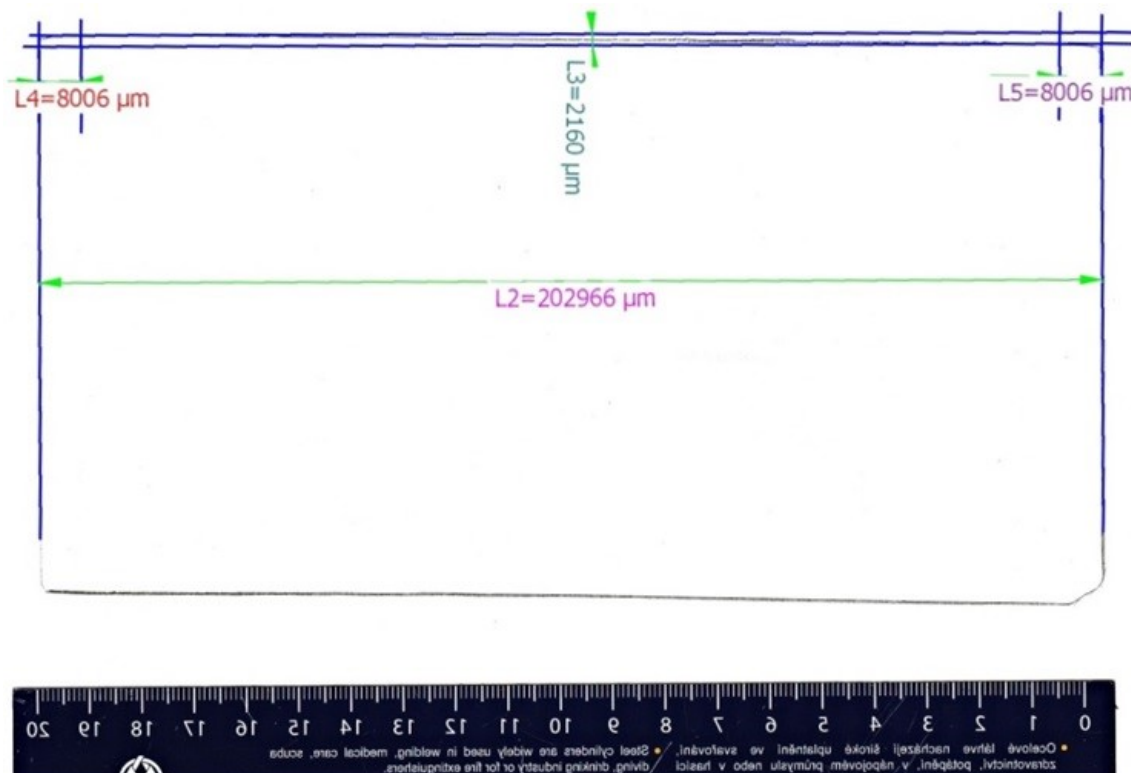
Tab. 12 – Toleranční pole úchylky kolmosti. [19]

Toleranční pole	Úchylka kolmosti [mm]
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,001a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$

Tab. 13 – Velikosti Δa . [19]

Tloušťka řezu a [mm]	Δa [mm]
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 200 \leq 250$	8

Bylo provedeno měření úchytky kolmosti tak, že se pořídily fotografie pod mikroskopem s následným změřením kolmosti pomocí programu QuickPHOTO Industrial 3.0. Na obr. 17 lze vidět výsledná fotografie měření – pro příklad byl zvolen vzorek 1. Kde hodnota L3 je naše výsledná hodnota kolmosti „u“, hodnoty L4, L5 jsou v tomto případě hodnoty Δa , a rozměr L2 je celková tloušťka materiálu. Ostatní fotografie výsledků měření jsou v přílohách A, B.



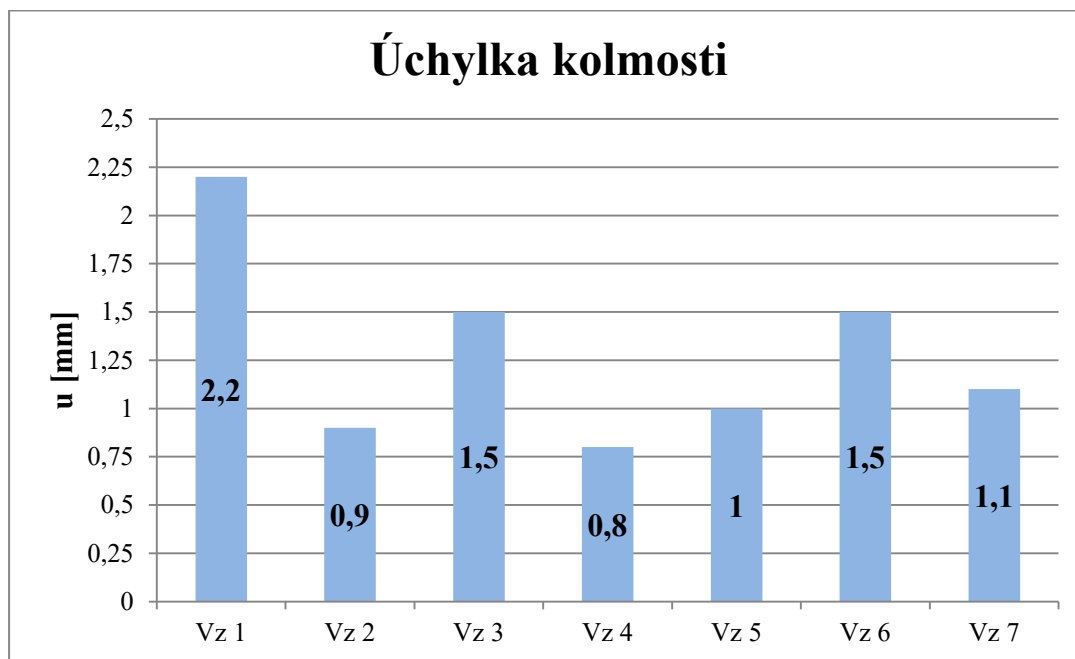
Obr. 17 – Příklad měření úchytky kolmosti pro vzorek 1.

V tab. 14 jsou uvedeny výsledné hodnoty měření úchytky kolmosti všech sedmi vzorků, které jsou porovnány s tolerančním polem dle ČSN EN ISO 9013 (tab. 12). [19]

Tab. 14 – Výsledné hodnoty úchytky kolmosti.

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7
u [mm]	2,2	0,9	1,5	0,8	1	1,5	1,1
Toleranční pole	3	2	4	4	3	4	3

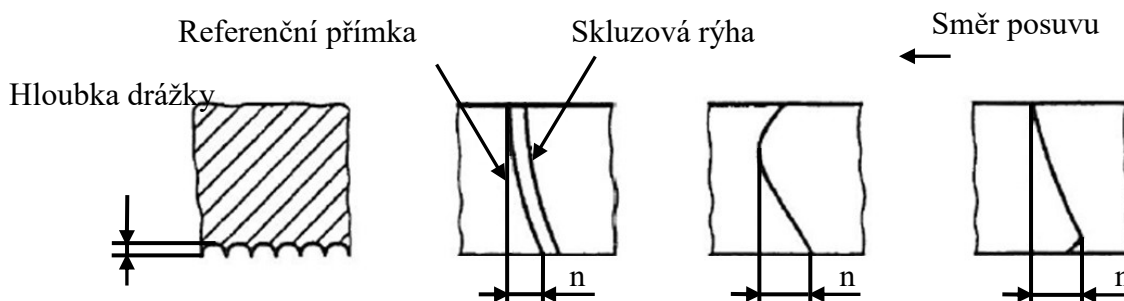
Na obr. 18 je grafické porovnání výsledných hodnot úchylek kolmosti. Z výsledků lze určit, že nejmenší úchylku kolmosti dosahuje vzorek 4, který má tloušťku 30 mm a byl pálen s předehřevem 130 °C. Nejvyšší úchylku dosahuje vzorek 1, který má tloušťku 200 mm a byl pálen s předehřevem na 230 až 250 °C. Porovnáním vzorku 3 se vzorky po optimalizaci (5, 6 a 7) plyne, že u vzorku 6 nenastala změna úchylky kolmosti, a v případě vzorků 5 a 7 se hodnota úchylky kolmosti snížila.



Obr. 18 – Grafické znázornění výsledů úchylky kolmosti.

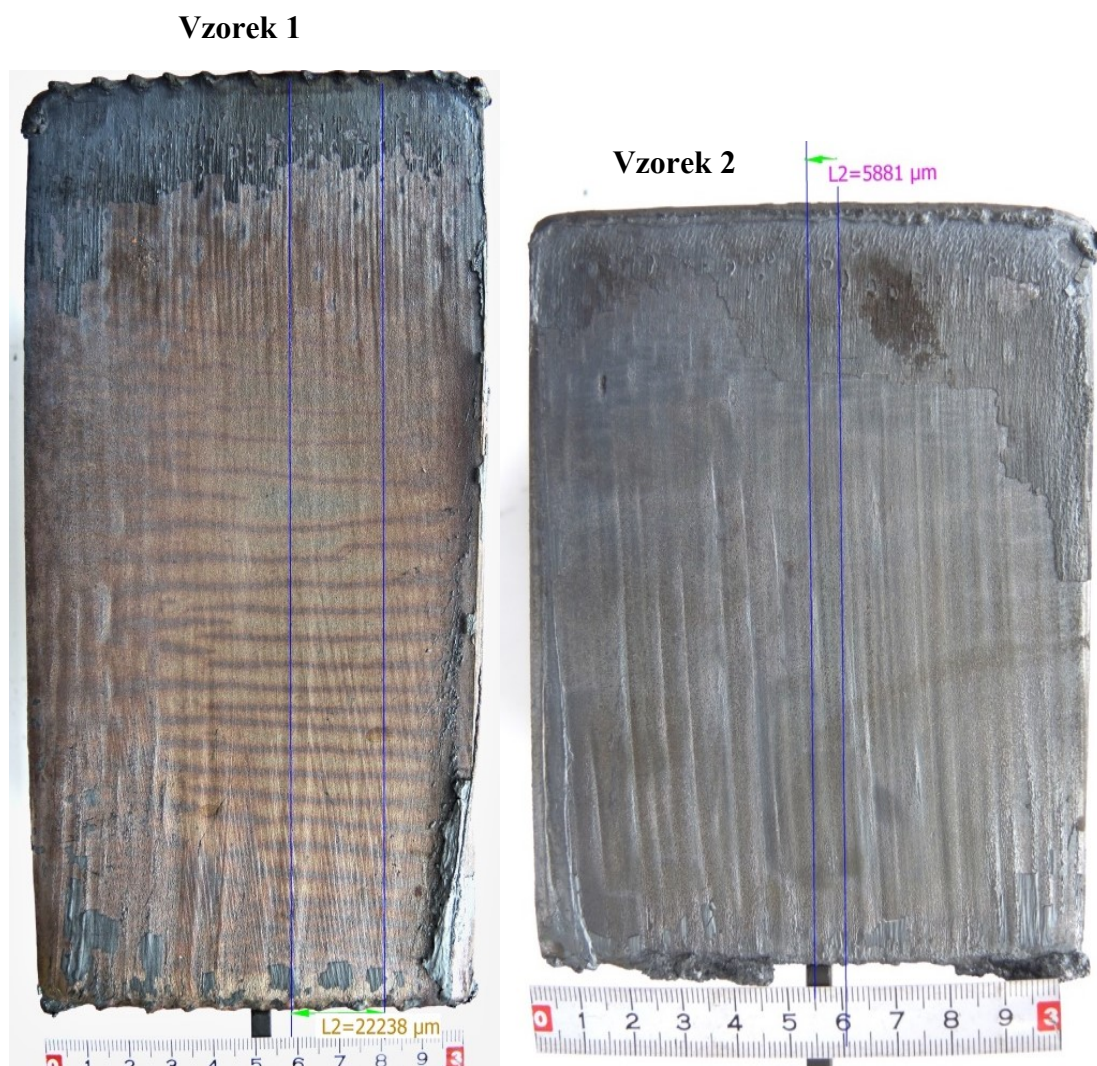
3.3.3. Skluz (n)

Stanovuje se ve směru řezání jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy (obr. 19). Skluz je dodatečná charakteristická veličina pro určení jakosti povrchu řezu. [19]



Obr. 19 – Skluzová rýha. [19]

Pomocí fotodokumentace (foceno pod mikroskopem) se změřil průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání pomocí programu QuickPHOTO Industrial 3.0. Na obr. 20 lze vidět výsledná fotografie měření – pro příklad byl zvolen vzorek 2. Kde hodnota L2 je naše výsledná hodnota skluzu „n“. Ostatní fotografie výsledků měření jsou v přílohách C, D.



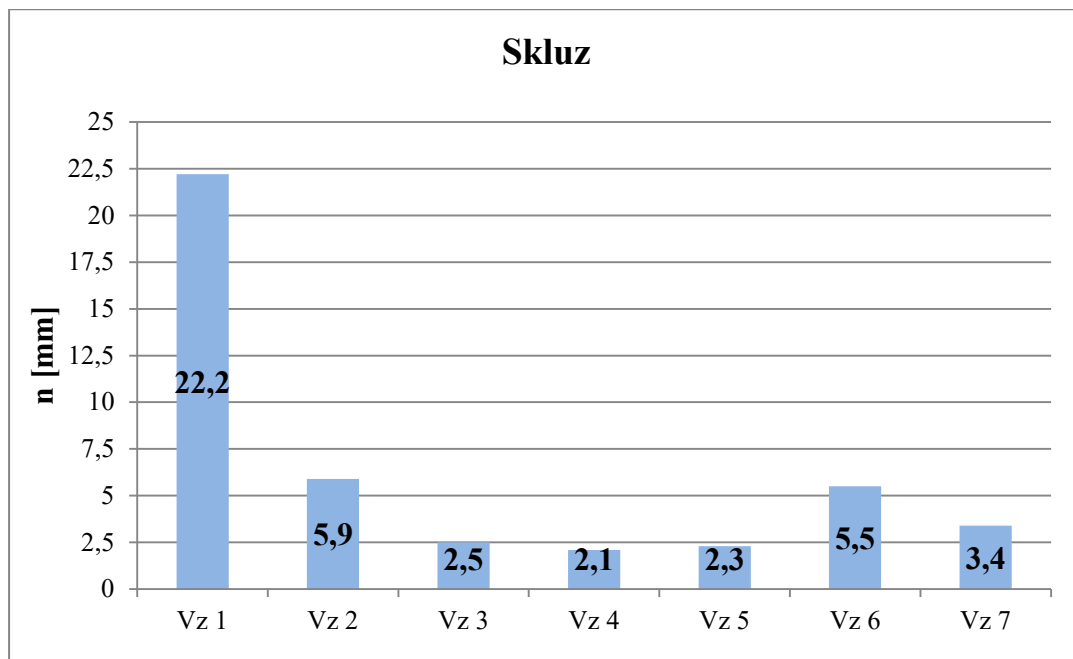
Obr. 20 – Příklad měření skluzu pro vzorek 1 a 2.

V tab. 15 jsou uvedeny výsledné hodnoty měření skluzu u všech sedmi vzorků.

Tab. 15 – Výsledné hodnoty skluzu.

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7
n [mm]	22,2	5,9	2,5	2,1	2,3	5,5	3,4

Na obr. 21 je grafické porovnání výsledných hodnot skluzu. Z naměřených hodnot vyplývá, že skluz u vzorku 1, který má tloušťku 200 mm, je několikanásobně vyšší v porovnání s dalšími vzorky. Při porovnání vzorků 3, 5, 6 a 7 z plechu o tloušťce 75 mm došlo po optimalizaci parametrů ke snížení hodnoty kluzu pouze v případě vzorku 5. Vzorek 6 a 7 v porovnání s vzorkem 3 dosáhl vyšších hodnot skluzu.



Obr. 21 – Grafické znázornění výsledů skluzu.

3.4. Měření tvrdosti

Tvrdot byla hodnocena pomocí přenosného tvrdoměru Krautkramer MIC 20, který měří tvrdost podle metody Ultrasonic Compact Impedance – UCI. Tvrdot byla měřena dle Vickerse HV5 (zatížení 5 kg), kde měření je založené na vtlačování diamantového čtyřbokého jehlanu do zkoušeného materiálu. Zkušební zatížení se vytváří ručně a je důležité, aby při měření sonda byla postavena kolmo na měřený povrch. Po vyvinutí dostatečné síly zazní tón a výsledná hodnota tvrdosti se zobrazí na displeji. [22]

Tvrdot byla měřena v náhodných vzdálenostech nejprve na pálené ploše, kde by měření mohlo být ovlivněno skluzovými plochami, proto se měřená plocha musela nejprve vybrousit. Dále se měřila tvrdost na metalografických výbrusech v náhodných vzdálenostech nejprve v TOO a poté i v základním materiálu.

Všechny průměrné výsledné hodnoty tvrdosti byly srovnány s maximální dovolenou hodnotou tvrdosti, která je dle ČSN EN 1090 – 2 + A1 pro konstrukční oceli S690 stanovena na 450 HV 10. [17]

3.4.1. Tvrdost pálené plochy

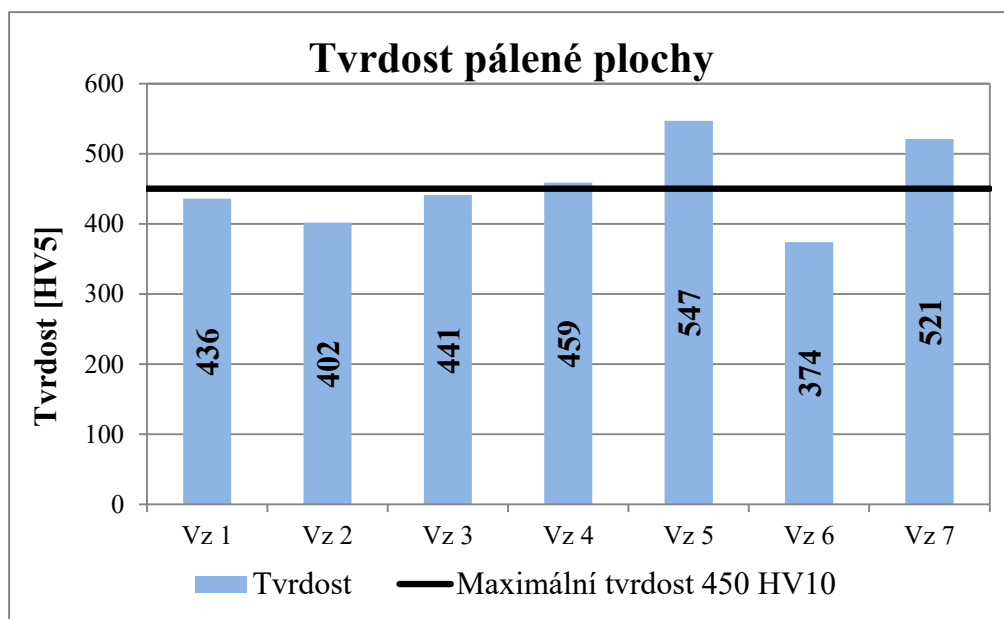
Provádělo se 10 měření na předem upravené ploše na všech 7 vzorcích. Výsledné hodnoty jsou znázorněny v tab. 16, včetně výsledného průměru z naměřených hodnot „ \bar{x} “.

Tab. 16 – Výsledné hodnoty tvrdosti HV 5 pálené plochy.

Měření	Hodnota tvrdosti HV 5						
	Číslo vzorku						
	1	2	3	4	5	6	7
1	438	406	442	453	539	365	512
2	440	404	446	455	538	374	518
3	442	398	439	463	546	378	524
4	427	390	444	470	557	379	521
5	428	405	449	465	557	372	529
6	435	403	441	460	540	376	520
7	441	389	433	458	555	379	505
8	443	410	435	450	552	375	534
9	436	409	438	462	545	368	510
10	432	401	440	451	543	370	532
\bar{x}	436	402	441	459	547	374	521

Výsledné zprůměrované hodnoty tvrdosti pálené plochy jsou graficky znázorněny na obr. 22. U prvních tří vzorků je tvrdost nižší než požadované maximum. Nižších tvrdostí je dosaženo díky relativně nízkým řezacím rychlostem a použitím předehřevu, což vede k pomalejšímu ochlazování pálených ploch. Vzorek 6 také vyhovuje požadovanému maximu, řezná rychlost je zde o něco vyšší než u prvních tří pálených vzorků, ale je zde také použit předehřev. Dva vzorky, 5 a 7, nevyhovují požadovanému maximu tvrdosti. U pátého vzorku byla řezná rychlost 250 mm/min, stejná jak u vzorku 6, ale pálení probíhalo bez použití předehřevu. Vzorek 7 byl pálen s menší řeznou rychlostí (200 mm/min),

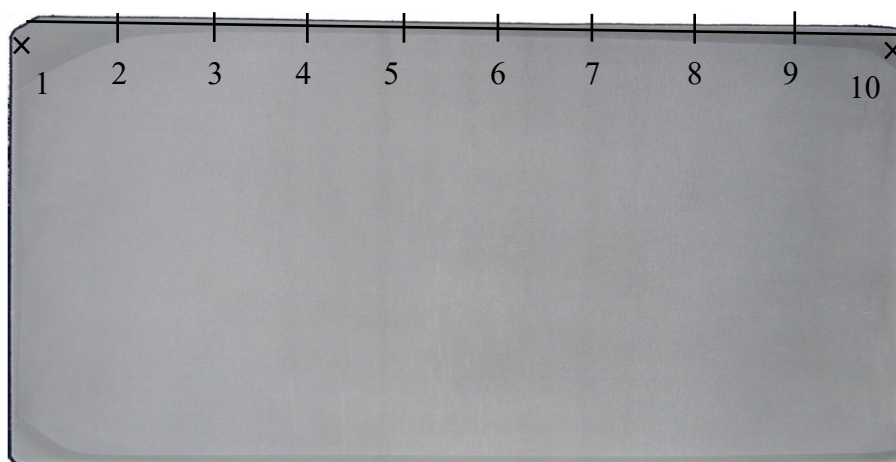
než pátý vzorek, a byl pálen také bez použití přehřevu. Z toho vyplývá, že u těchto dvou vzorků došlo k rychlému ochlazování pálených hran a tudíž ke zvýšení tvrdosti.



Obr. 22 – Grafické znázornění tvrdosti pálených ploch.

3.4.2. Tvrdost v TOO

Bylo provedeno 10 měření v tepelně ovlivněné oblasti na metalografickém výbrusu. Jednotlivé vpichy byly provedeny v náhodných vzdálenostech po celé tloušťce vzorku směrem od horní strany ke spodní straně (obr. 23). V tab. 17 jsou znázorněny výsledné hodnoty měření všech vzorků a jejich aritmetické průměry „ \bar{x} “.

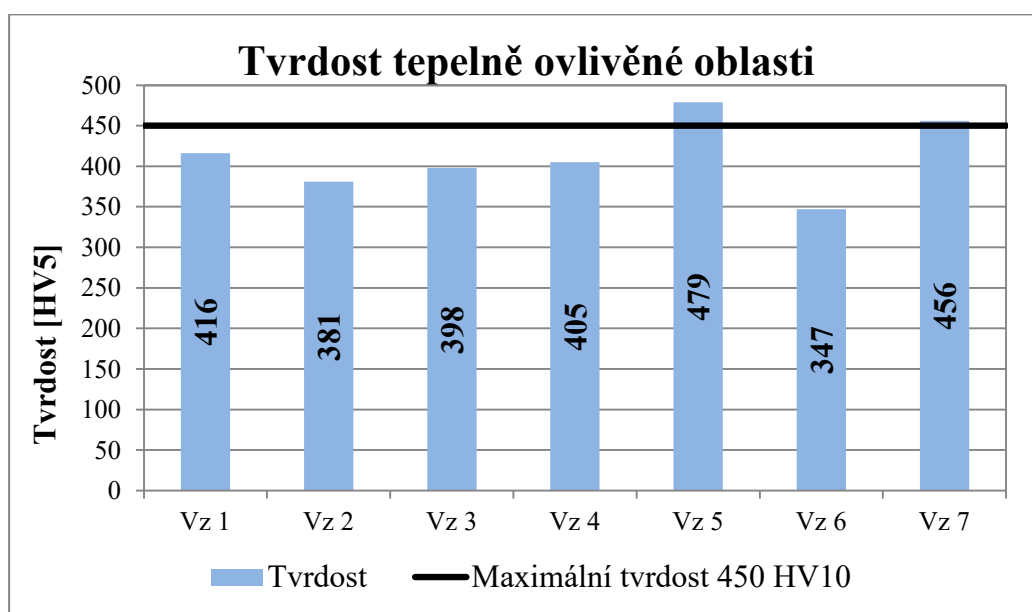


Obr. 23 – Znázornění míst vpichů v TOO pro vzorek 1 – 200 mm.

Tab. 17 – Výsledné hodnoty tvrdosti HV 5 tepelně ovlivněné oblasti.

Měření	Hodnota tvrdosti HV 5						
	Číslo vzorku						
	1	2	3	4	5	6	7
1	411	371	399	395	487	343	448
2	410	387	409	398	479	351	456
3	420	373	405	402	471	338	461
4	423	390	395	397	481	348	452
5	428	375	389	406	484	353	460
6	415	384	398	409	475	357	449
7	408	379	401	407	469	351	457
8	414	389	402	413	483	345	453
9	412	386	392	408	480	342	462
10	418	378	390	415	478	340	460
\bar{x}	416	381	398	405	479	347	456

Na obr. 24 je grafické znázornění zprůměrovaných hodnot tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti. U všech vzorků byla tvrdost v TOO nižší než na pálené ploše. U vzorků 5 a 7 je tvrdost v TOO vyšší než požadované maximum. Dalších pět vzorků splňuje požadavek na maximální hodnotu tvrdosti, ale vzorek 4 nevyhovuje požadavkům stanoveným dle normy, protože na pálené ploše dosahuje tvrdosti vyšší než povolené maximum.

**Obr. 24** – Grafické znázornění tvrdosti tepelně ovlivněných oblastí.

3.4.3. Tvrdost základního materiálu

Provedlo se 10 měření v základním materiálu na metalografickém výbrusu. Jednotlivé vpichy byly provedeny v náhodných vzdálenostech po celé tloušťce vzorku směrem od horní strany ke spodní straně (obr. 25). Všechny výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 18, kde je také uveden aritmetický průměr naměřených hodnot „ \bar{x} “.

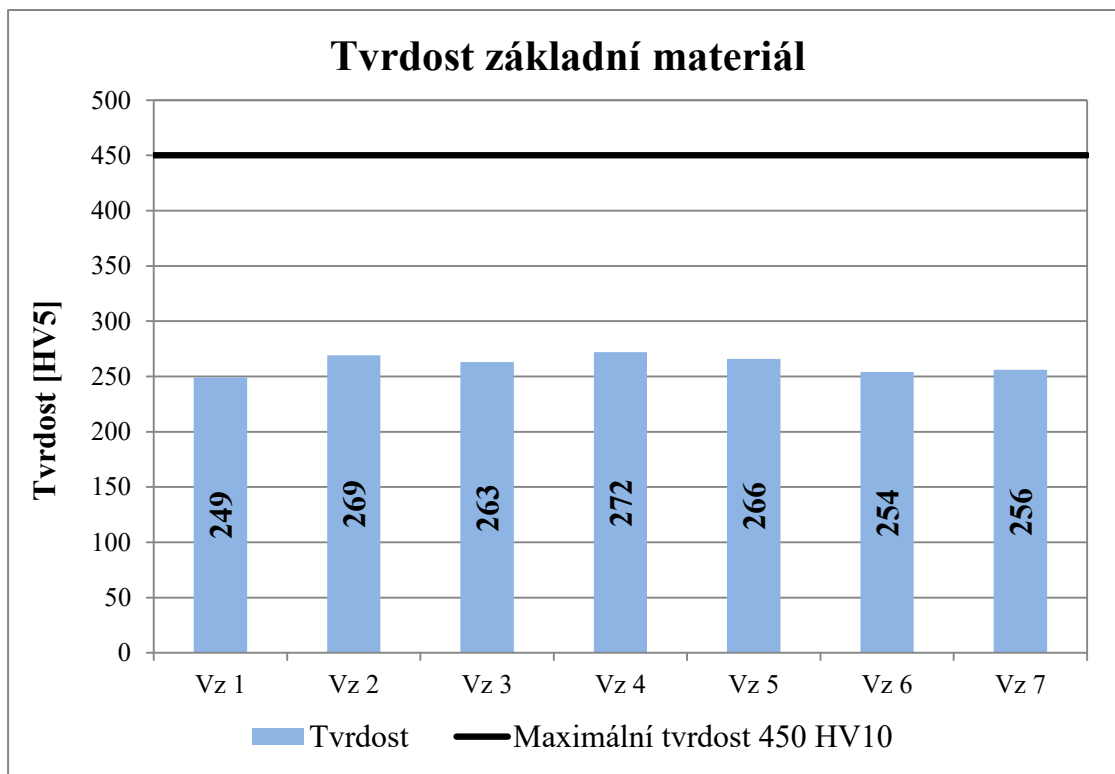


Obr. 25 – Znázornění míst vpichů v základním materiálu pro vzorek 2 – 130 mm.

Tab. 18 – Výsledné hodnoty tvrdosti HV 5 základního materiálu.

Měření	Hodnota tvrdosti HV 5						
	Číslo vzorku						
	1	2	3	4	5	6	7
1	245	274	257	266	272	246	264
2	249	266	257	277	260	252	253
3	258	262	274	268	267	254	255
4	242	267	265	279	263	259	249
5	252	268	261	272	266	257	251
6	250	279	258	279	275	261	258
7	245	265	266	270	257	258	262
8	256	261	268	267	262	249	257
9	248	276	264	272	268	253	250
10	243	270	259	269	273	250	261
\bar{x}	249	269	263	272	266	254	256

Součástí práce bylo také zkontrolovat tvrdost základního materiálu. Po provedené deseti náhodných vpichů byly výsledné hodnoty zprůměrovány a zaznamenány na obr. 26. Z výsledných hodnot si lze všimnout, že tvrdost základních materiálů splňuje požadavek na maximální tvrdost.



Obr. 26 – Grafické znázornění tvrdosti základních materiálů.

4. Závěr

V teoretické části této diplomové práce byla popsána charakteristika vysokopevnostních konstrukčních ocelí řady Weldox. Tyto oceli jsou jemnozrnné mikrolegované, zušlechtěné kalením do vody. Dále byla popsána studie tepelného dělení materiálu, které má v současné době mnohem vyšší výrobní produktivitu v porovnání s mechanickými metodami. Jako první byla popsána metoda tepelného dělení plamenem, kde jsou charakterizovány fyzikálně metalurgické procesy řezu, řezatelnost plamenem, zařízení používané touto metodou, poruchy a chyby. Velkou výhodou této metody je především možnost dělit téměř jakékoli tloušťky plechů a ekonomická nenáročnost. Další řešenou metodou je dělení plazmou. U této metody byl popsán fyzikální princip vzniku plazmy, zařízení pro dělení plazmou, používané plyny a chyby, které mohou vzniknout na pálených plochách. Výhodou plazmy je především větší rychlost řezání než u plamene, nevýhodou rozměrové omezení tlouštěk pálených plechů. Poslední zmiňovanou metodou bylo tepelné dělení laserem. Zde jsou popsány typy laserů, metody dělení laserem a v neposlední řadě řezatelnost a základní charakteristiky procesu. Mezi výhody se řadí velká rychlost řezání, vyšší produktivita a vysoká přesnost pálených dílů. Pořizovací a provozní náklady jsou vysoké, tloušťka dělených ocelových plechů je do 30 mm.

Klíčovou částí práce byla optimalizace parametrů při autogenním řezání ocelí jakosti S690QL. Vzorky byly páleny z materiálů N-A-XTRA M700 a DILLIMAX690T. První vzorky měly po vypálení nevyhovující kvalitu pálených ploch a musely být upravovány další technologií – broušením. Optimalizace parametrů pálení dalších vzorků byla směřována na zlepšení kvality pálených ploch, aby se zabránilo dalšímu opracování. Výsledkem je vyšší spokojenost zákazníka a snížení nákladů na výrobu výpalků.

Následně byl proveden rozbor základních materiálů o tloušťkách 30, 75, 130 a 200 mm, které se používaly pro pálení vzorků. Zahrnuje chemické složení (rozbor tavby) jednotlivých použitých materiálů, které vyhovuje normě ČSN EN 10025 – 6 + A1.

Pro experiment byl použit stroj Suprarex SXE – P3. Předehřívání vzorků probíhalo v místě řezu pomocí trysky hořáku nebo na nahřívacím stole. Z hlediska procesu pálení je výhodné dělit bez použití předehřevu, což vede ke snížení provozních nákladů a úspoře času.

Hodnocení kvality pálené plochy bylo provedeno se zaměřením na průměrnou výšku prvků profilu Rz5, úchylku kolmosti a skluz dle ČSN EN ISO 9013. Pro měření průměrné výšky prvků profilu Rz5 byl použit přístroj Mitutoyo SJ 301 a Alicona Infinite Focus. Vždy byla měřena plocha s nejvyšší drsností. Všechny výsledné hodnoty byly zařazeny do příslušného tolerančního pole. Po optimalizaci parametrů se drsnost povrchu podařila zlepšit v porovnání tloušťek plechů 75 mm až o 50%. Nejvyšší drsnost povrchu 162,87 μm byla naměřena na vzorku 6 a nejnižší 34,48 μm na vzorku 7.

Ke stanovení úchylky kolmosti a hodnoty skluzu byly pořízeny fotografie pod mikroskopem, na kterých se pomocí počítačového programu odměřila výsledná hodnota. Úchylky kolmosti byly přiřazeny k danému tolerančnímu poli. Z porovnání vzorků 3, 5, 6 a 7 vyplývá, že úchylka kolmosti se snížila pouze u vzorků 5 a 7. Hodnota skluzu byla nejvyšší u vzorku 1 a nejnižší u vzorku 4.

Rovněž byla hodnocena tvrdost pálených ploch, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, kde výsledné hodnoty byly porovnány s maximální dovolenou tvrdostí dle ČSN EN 1090 – 2 + A1. K měření tvrdosti základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti se připravily metalografické výbrusy. U vzorků po optimalizaci došlo ke zvýšení tvrdosti na pálených plochách i v tepelně ovlivněné oblasti, v důsledku rychlejšího ochlazování pálených ploch, což zapříčinilo pálení bez předeřevu a se zvýšenou řeznou rychlostí. Nejvyšší hodnoty tvrdosti podle Vickerse HV 5 byly naměřeny na pálených plochách, kde pátý vzorek dosahoval tvrdosti 547, sedmý 521 a čtvrtý vzorek 459. Tyto tři zmíněné vzorky přesahují maximální dovolenou tvrdost 450. Nejnižší tvrdost 374 byla naměřena na vzorku 3.

Na závěr je nutno podotknout, že po optimalizaci parametrů pálení vzorků z tloušťky plechu 75 mm byla průměrná výška profilu Rz5 a úchylka kolmosti zlepšena na úkor vyšší výsledné tvrdosti, která přesahuje povolené maximum.

5. Seznam použité literatury

- [1] KONSTRUKCE Media, s.r.o. *Svařování jemnozrnných, vysokopevnostních ocelí* [online]. ©2002 – 2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-jemnozrnnych-vysokopevnostnich-oceli/ >.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [4] Bohdan Bolzano, s.r.o. *Ploché výrobky válcované za tepla ze svařitelných jemnozrnných konstrukčních ocelí* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < www.bolzano.cz/assets/files/TP/Ploche_vyrobky/MOP_EP_EN%2010025-6TDP.pdf >.
- [5] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [6] ESAB. *Jak nejlépe řezat ocelové plechy* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < www.esab.cz/cz/cz/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm >.
- [7] MINAŘÍK, Václav. *Plamenové svařování*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 80-7183-080-1.
- [8] JEFFUS, Larry F. *Welding: principles and applications*. Eighth edition. Boston: Cengage Learning, 2016. ISBN 978-1-305-49469-5.
- [9] CARY, Howard B. a Scott C HELZER. *Modern welding technology*. 6th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, c2005. ISBN 0-13-113029-3.
- [10] BLAŠČÍK, František. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarania*. Bratislava: Alfa, 1988.
- [11] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

- [12] Idoc. *16-17-83-84.pdf* [online]. ©2015 – 2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf >.
- [13] MM Průmyslové spektrum. *Nekonvenční metody obrábění – 8. díl* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html >.
- [14] ESAB. *Jak řešit problémy s kvalitou řezu při řezání plazmou* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < www.esab.cz/cz/cz/education/blog/how-to-troubleshoot-plasma-cut-quality.cfm >.
- [15] MM Průmyslové spektrum. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html >.
- [16] MM Průmyslové spektrum. *Nekonvenční metody obrábění – 5. díl* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z WWW: < www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html >.
- [17] ČSN EN ISO 1090-2:A1. *Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí – Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce*. Praha, 2012.
- [18] ČSN EN 10025-6+A1. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 6: Technické dodací podmínky na ploché výrobky s vyšší mezí kluzu po zušlechťování*. Praha, 2005.
- [19] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu (ISO 9013:2002)*. Praha, 2003.
- [20] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha, 1999.
- [21] MM Průmyslové spektrum. *Komplexní hodnocení jakosti povrchu* [online]. ©2017 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z WWW: < www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-hodnoceni-jakosti-povrchu.html >.
- [22] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: 2006

6. Seznam příloh

Příloha A – Měření úchylky kolmosti vzorku 2, 3 a 4.

Příloha B – Měření úchylky kolmosti vzorku 5, 6 a 7.

Příloha C – Měření skluzu vzorku 3 a 4.

Příloha D – Měření skluzu vzorku 5, 6 a 7.

7. Seznam obrázků

Obr. 1 – Princip tepelného dělení materiálu plamenem. [5]	13
Obr. 2 - Konstrukce hořáku se směšovacími komorami ve špičce. [8].....	16
Obr. 3 – Konstrukce injektorového (vstřikovacího) hořáku. [8].....	16
Obr. 4 – Konstrukce trysek v řezu. [8]	17
Obr. 5 – Chyby na řezných plochách. [10]	18
Obr. 6 – Rozdíl rychlosti řezání plazmou a kyslíkem. [5]	20
Obr. 7 – Schéma tepelného dělení plazmou. [12]	21
Obr. 8 – Typy plazmových hořáků. [13].....	22
Obr. 9 – Schéma zařízení pro obrábění laserem. [15].....	26
Obr. 10 – Schéma ND: YAG laseru. [8]	27
Obr. 11 – Pálicí stroj Suprarex SXE – P3.	30
Obr. 12 – Proces pálení vzorků a nahřívací stůl.....	32
Obr. 13 – Průměrná výška profilu Rz5. [19].....	33
Obr. 14 – 3D pohled na naměřenou plochu.	34
Obr. 15 – Grafické znázornění výsledů průměrné výšky profilů Rz5.	35
Obr. 16 – Úchylka kolmosti pro svislý řez. [19].....	36
Obr. 17 – Příklad měření úchylky kolmosti pro vzorek 1.....	37
Obr. 18 – Grafické znázornění výsledů úchylky kolmosti.....	38
Obr. 19 – Skluzová rýha. [19]	38
Obr. 20 – Příklad měření skluzu pro vzorek 1 a 2.....	39
Obr. 21 – Grafické znázornění výsledů skluzu.	40
Obr. 22 – Grafické znázornění tvrdosti pálených ploch.....	42
Obr. 23 – Znázornění míst vpichů v TOO pro vzorek 1 – 200 mm.	42
Obr. 24 – Grafické znázornění tvrdosti tepelně ovlivněných oblastí.....	43
Obr. 25 – Znázornění míst vpichů v základním materiálu pro vzorek 2 – 130 mm.	44
Obr. 26 – Grafické znázornění tvrdosti základních materiálů.	45

8. Seznam tabulek

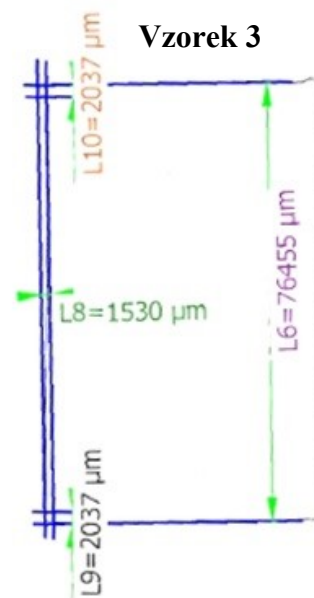
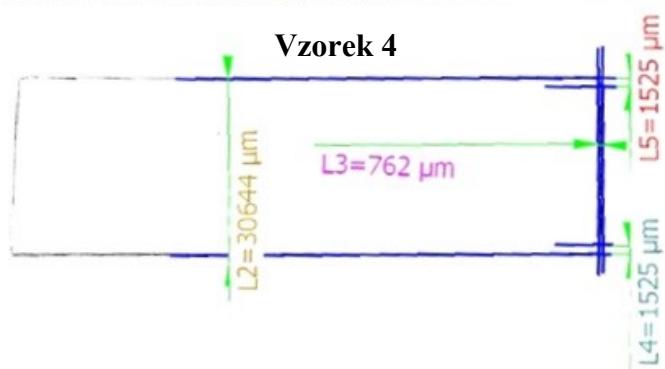
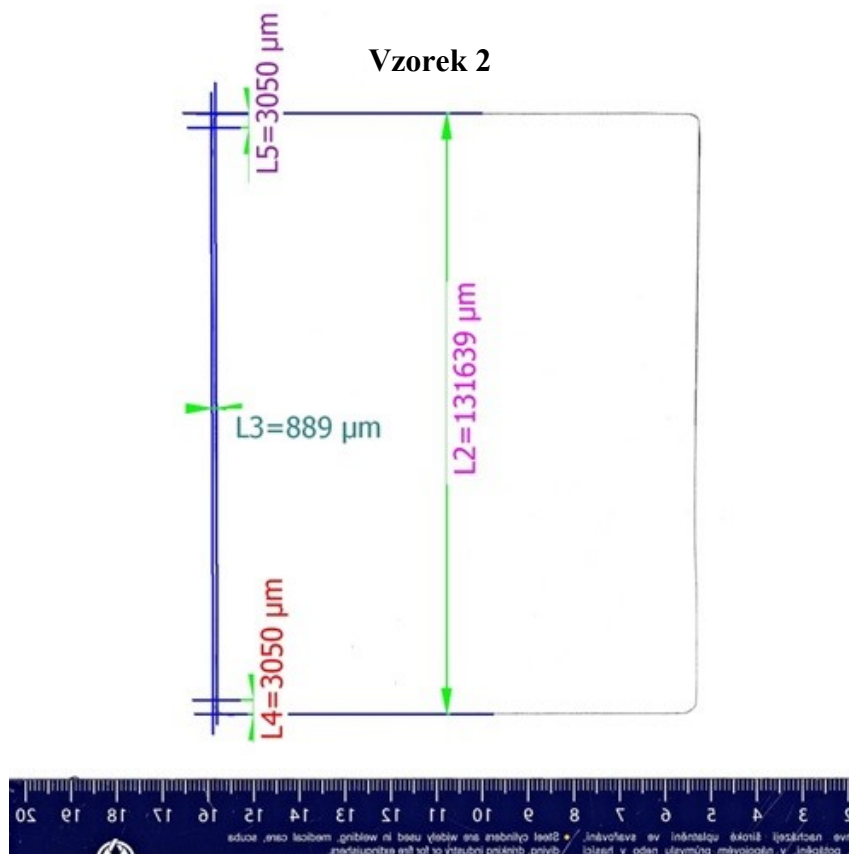
Tab. 1 – Tabulka teplot předehřevu a ohlazování. [7]	15
Tab. 2 – Chyby a příčiny na řezných plochách. [10]	19
Tab. 3 – Chyby a příčiny na plamenu. [10].....	19
Tab. 4 – Chyby a příčiny při dělení plazmou. [14]	25
Tab. 5 – Tloušťky a materiály vzorků.....	31
Tab. 6 – Chemické složení (rozběr tavby) materiálů vzorků.....	31
Tab. 7 – Mechanické vlastnosti oceli jakosti S690QL při okolní teplotě. [18].....	31
Tab. 8 – Parametry pálení vzorků.	32
Tab. 9 – Toleranční pole průměrné výšky prvků profilu Rz5. [19]	33
Tab. 10 – Výsledné hodnoty průměrné výšky profilu Rz5 vzorků 1 až 4.....	34
Tab. 11 – Výsledné hodnoty průměrné výšky profilu Rz5 vzorků 5 až 7.....	35
Tab. 12 – Toleranční pole úchylky kolmosti. [19]	36
Tab. 13 – Velikosti Δa . [19]	36
Tab. 14 – Výsledné hodnoty úchylky kolmosti.....	37
Tab. 15 – Výsledné hodnoty skluzu.	39
Tab. 16 – Výsledné hodnoty tvrdosti HV 5 pálené plochy.	41
Tab. 17 – Výsledné hodnoty tvrdosti HV 5 tepelně ovlivněné oblasti.	43
Tab. 18 – Výsledné hodnoty tvrdosti HV 5 základního materiálu.....	44

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí této diplomové práce paní Ing. Lucii Krejčí, Ph.D. za poskytnuté cenné připomínky, odborné rady, konzultace a za trpělivost během řešení mého úkolu.

Příloha A

Měření úchylky kolmosti (vzorek 2, 3, 4).

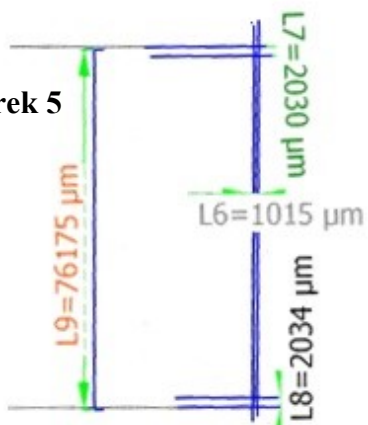


Příloha B

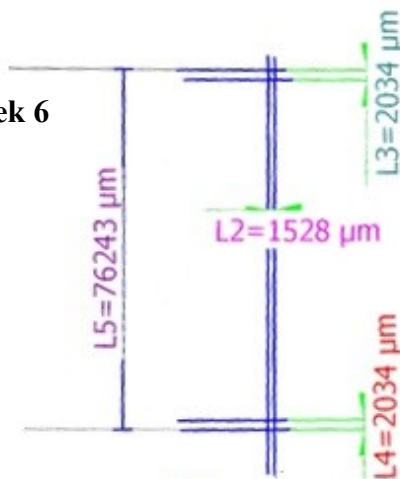
Měření úchylky kolmosti (vzorek 5, 6, 7).



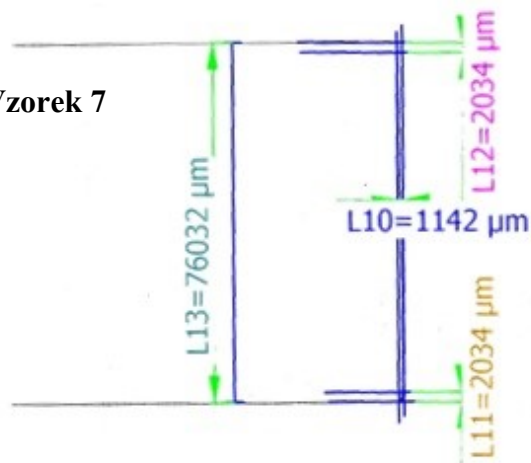
Vzorek 5



Vzorek 6

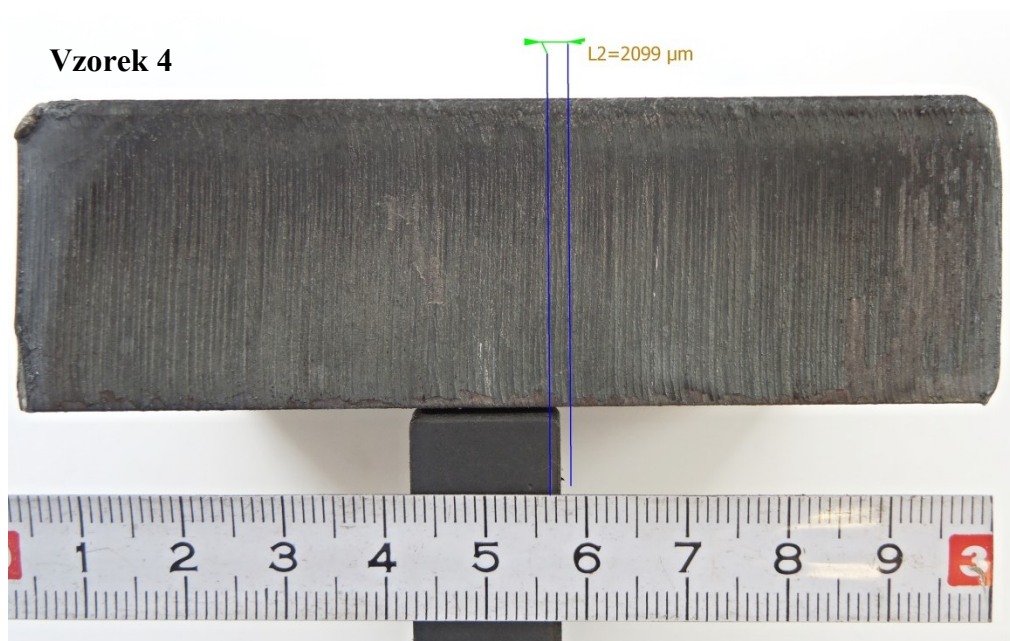
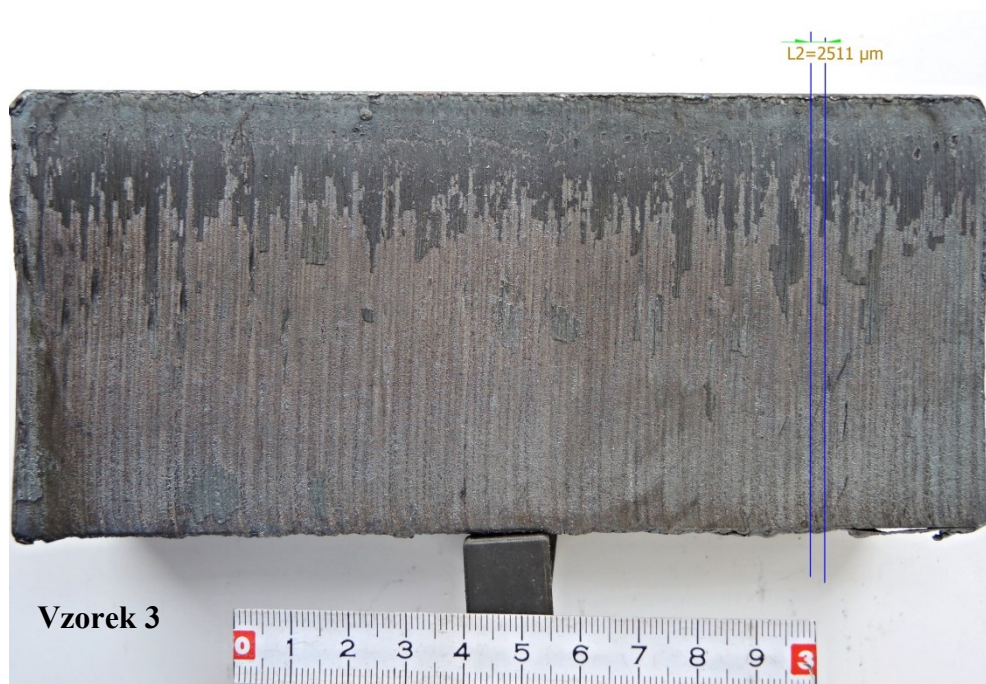


Vzorek 7



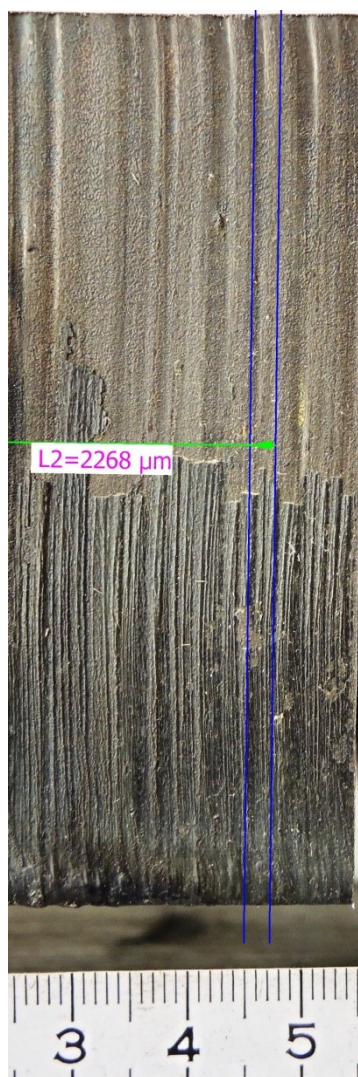
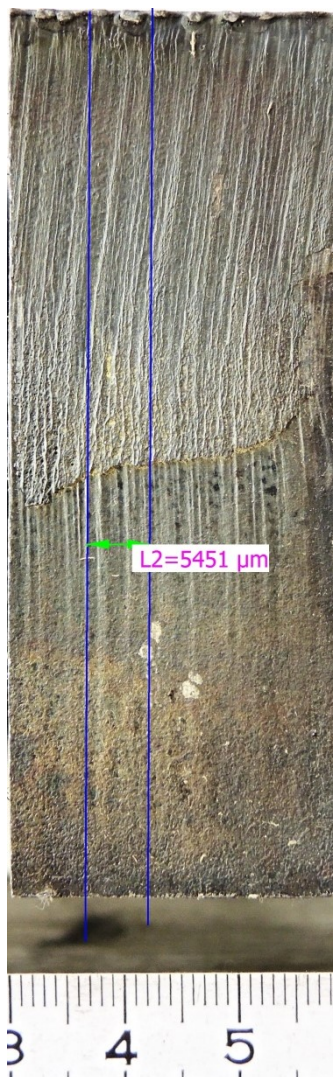
Příloha C

Měření skluzu vzorku 3 a 4.



Příloha D

Měření skluzu vzorku 5, 6 a 7.

Vzorek 5**Vzorek 6****Vzorek 7**